

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra slévárenství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra slévárenství

Studium nukleace grafitu litin očkovaných bórem

Study of graphic nucleation of cast irons inoculated with boron

Student:

Bc. Lea Pechálová

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.

Akademický rok: 2009/2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lea Pechálová**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T033 Slévárenské technologie
Téma: Studium nukleace grafitu litin očkovaných bórem
Study of graphic nucleation of cast irons inoculated with boron

Zásady pro vypracování:

1. Stanovení cíle práce a postupu řešení
2. Literární rozbor způsobů očkování litin
3. Návrh metalurgie a technologie lité zkušební odlitky
4. Provedení experimentálních taveb
5. Závěrečné zhodnocení výsledků a cílů práce

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VONDRÁK, V.; HAMPL, J.; HANUS, A.: Metalurgie litin-mimopecní zpracování roztavené litiny, VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [2] MYSLIVEC, T.: Fyzikálně chemické základy ocelářství, Praha, 1971.
- [3] NEUMANN, F.: Gusseisen, Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1999.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Lubomír Ouda

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 30.04.2010




prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list + zásady pro vypracování DP | 5. Textová část DP |
| 2. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 6. Seznam použité literatury |
| 3. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 7. Přílohy |
| 4. Obsah DP | |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře. Za titulním listem následují tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“.

ad 2) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. *V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracujících právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.*

ad 3) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 4) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 5)

Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 7).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U

vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 6) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 7) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

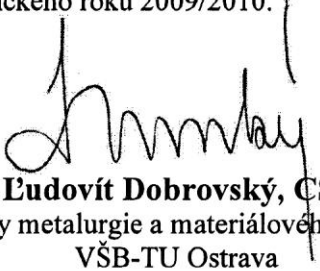
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2009


Prof. Ing. Ľudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 7. 5. 2010



.....
jméno a příjmení studenta

Jilešovice 61, Háj ve Slezsku 747 92

.....
adresa trvalého pobytu studenta

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně.

V Ostravě: 7. 5. 2010



.....
Bc. Lea Pechálová

Ráda bych touto cestou poděkovala za konzultace a odborné vedení mé diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Hamplovi, Ph.D.

Dále děkuji p. Subíkové z laboratoří strukturní analýzy za cenné rady a prostory pro odbornou práci a zaměstnancům z Vítkovické slévárny s. r. o. za praktické konzultace.

A také bych ráda poděkovala rodičům a příteli za podporu a poskytnuté zázemí při zpracovávání mé diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce analyzuje vliv bóru na výslednou krystalizaci indefinitní litiny (ICDP), s cílem porovnat nukleaci grafitu očkované litiny, na vzorcích z experimentálních taveb a z používaných válců.

První část diplomové práce zahrnuje teoretický základ, který vysvětluje pojmy očkování, krystalizace, modifikace a působení bóru v litině. Druhá praktická část popisuje provedené tavby, zpracování vzorků a výsledné struktury litiny.

V závěru je prezentováno porovnání a vyhodnocení účinku bóru v litině.

Klíčová slova: očkování, krystalizace, bór, mikrostruktura, litina.

Abstract

This diploma thesis analyzes the influence of boron on final crystallization of indefinite cast iron (ICDP) with the aim to compare nucleation of graphite inoculated cast iron on samples of experimental melts and used rollers.

The first part of this thesis includes a theoretical framework that explains the concepts of inoculation, crystallization, modification and the effect of boron in cast iron. The second practical part describes the process of melting, sample processing, and the resulting structure of cast iron.

The conclusion of this thesis is presented a comparison and evaluation of the effect of boron in cast iron.

Key words: inoculation, crystallization, boron, microstructure, cast iron.

Obsah

Teoretická část

1. Stanovení cíle práce a postup řešení.....	1
2. Literární rozbor způsobu očkovaní litin	2
2.1 Úvod.....	2
2.2 Očkování	2
2.2.1 Princip očkovaní	4
2.2.2 Metody očkovaní	6
2.2.3 Kontrola očkovaní	9
2.2.4 Vady způsobené nesprávným očkováním.....	10
2.2.5 Složení a druhy očkovaadel	10
2.2.6 Doznívací účinek očkovaadla	13
2.3 Vliv bóru	14
2.3.1 Studium mikrostruktury	16
2.3.2 Studium eutektoidní transformace pomocí DSC měření	16
2.3.3 Působení bóru	16
2.3.4 Reakce bóru při tavení v indukční peci.....	17
2.4 Krystalizace litin	18
2.5 Modifikace.....	23

Praktická část

3. Návrh metalurgie a technologie lití zkušebních odlitků	24
4. Provedení experimentálních taveb	25
4.1 Vzorky z odlitých válců k porovnání výsledků	31
4.1.1 Výsledné struktury	33
4.2 První tavba.....	40
4.2.1 Výroba vzorků z tavby 1	43
4.2.2 Metalografické zpracování vzorků z tavby 1	43
4.2.3 Výsledné hodnoty vzorků z tavby 1	44
4.2.4 Výsledné struktury	46

4.3	Druhá tavba	53
4.3.1	Výroba vzorku z tavby 2	54
4.3.2	Zpracování vzorku z tavby 2	55
4.3.3	Výsledné hodnoty vzorků z tavby 2	55
4.3.4	Výsledné struktury	57
4.4	Třetí tavba	63
4.4.1	Výroba vzorků z tavby 3	64
4.4.2	Zpracování vzorků z tavby 3	64
4.4.3	Výsledné hodnoty vzorků z tavby 3	65
4.4.4	Výsledné struktury	67
5.	Závěrečné zhodnocení výsledků a cílů práce	75
6.	Seznam použité literatury	77
PŘÍLOHY	79

Seznam zkratek:

Cp	cementit
ČG	červíkovitý grafit
ICDP	indefinitní litina
KG	kuličkový grafit
KVZ	kovy vzácných zemin
LG	lupínkový grafit
LKG/GJS	litina s kuličkovým grafitem (tvárná litina)
LLG/GJL	litina s lupínkovým grafitem (šedá litina)
M	martenzit
NZG	nedokonale zrnitý grafit
Penízek spektrum	vzorek pro spektrální analýzu
PG	pavoučkovitý grafit
TA	termická analýza
TL	transformovaný ledeburit
A/I ↓ C -nauhličení před odpichem	tavba A, varianta I, nízký obsah uhlíku, bez ovlivnění grafitu
A/II ↓ C – nauhličení před odpichem, + B	tavba A, varianta II, nízký obsah uhlíku, očkování bórem
B/I C – konečný	tavba B, varianta I, s konečným obsahem uhlíku, bez ovlivnění grafitu
B/II C – konečný, + B	tavba B, varianta II, s konečným obsahem uhlíku, očkování bórem
A/I ↓ C – nauhličení před odpichem, +B	tavba A, varianta I, nízký obsah uhlíku, očkování B
A/II ↓ C – nauhličení před odpichem, + ↑ B.	tavba A, varianta II, nízký obsah uhlíku, + ↑ B
B/I m-NiMg	tavba B, varianta I, modifikace předslitinou NiMg
B/II m-NiMg+M	tavba B, varianta II, modifikace předslitinou NiMg +Mischmetall
ZKH	základní kovová hmota

Teoretická část

1. Stanovení cíle práce a postup řešení

Hlavním cílem této diplomové práce je posoudit vliv očkovaní bóru na krystalizaci při tuhnutí indefinitní litiny (ICDP). Získat vzorky tohoto materiálu a to provedením několika taveb, za použití bezrámových forem vyrobených z křemenného písku = ST směsi a chladítek, která simulují odlévání na kokilu, čímž ovlivníme rychlost odvodu tepla a tím i grafitizaci litiny. Z odlitých tvarů získáme vzorky pro metalografické výbrusy. Na mikrostrukturách porovnáme vliv ferobóru na nukleaci litiny.

Postup řešení:

- provést teoretický rozbor očkovaní, objasnit pojmy krystalizace a modifikace
- uskutečnit tavby, z nichž získáme vzorky pro metalografickou analýzu
- zanalyzovat získané vzorky v metalografické laboratoři
- získané výsledky vyhodnotit a uvést v závěru této práce

2. Literární rozbor způsobu očkovaní litin

2.1 Úvod

Očkování je mimopecní zpracování roztavené litiny, které spočívá ve vnášení grafitizačních zárodků do taveniny. Vnesené zárodky vyvolají krystalizaci grafitického eutektika. Předpokládá se, že z každého vneseného zárodku vykrytalizuje jedno eutektické zrno, jehož jádro je tvořeno z grafitu a obálka z austenitu [4]. Nedostatečné množství zárodků vede k podchlazení litiny, nevhodně vyloučenému grafitu a hrubozrnné struktuře v odlitku, tím se zvýší nebezpečí bílého tuhnutí litiny a získáme horší mechanické vlastnosti. Očkováním zvýšíme tvorbu grafitu, jeho rovnoměrné rozložení v litině a požadované mechanické vlastnosti.

V matrici dochází ke změně výsledné struktury z hrubozrnné na jemnozrnnou. Mezi účinné krystalizační zárodky řadíme jemné částice oxidů, nitridů, boridů, sulfidů a jejich sloučenin. Vzhledem k časově omezenému očkovacímu efektu, provádíme očkování těsně před, anebo v průběhu odlévání taveniny.

2.2 Očkování

Po vnesení očkovadla do taveniny probíhají vzájemné interakce aktivátoru (očkovadla) s některými prvky v litině, tím dochází ke zvýšení vylučujících se počtů zárodků a zlepšení mechanických vlastností, například: zabráníme tvorbě zákalky, zabránění vzniku volného cementitu, sníží se pnutí u tenkostěnných odlitků. Při očkování litiny s lupínkovým grafitem (LLG) ovlivníme velikost, množství lupínku grafitu, a také jeho rovnoměrné rozložení v litině. Oproti tomu, když očkujeme litinu s kuličkovým grafitem (LKG) ovlivníme strukturu základní kovové hmoty, tak, že dochází k odstranění cementitu v základní kovové hmotě a tím ke zvýšení pevnosti litiny. Je důležité vědět kolik očkovadla použijeme, protože může dojít také k přeočkování litiny, tím dochází ke vzniku vad v odlitku tzv. ředin a zvýšení struskovitosti. Očkovací účinek však nezvýšíme.

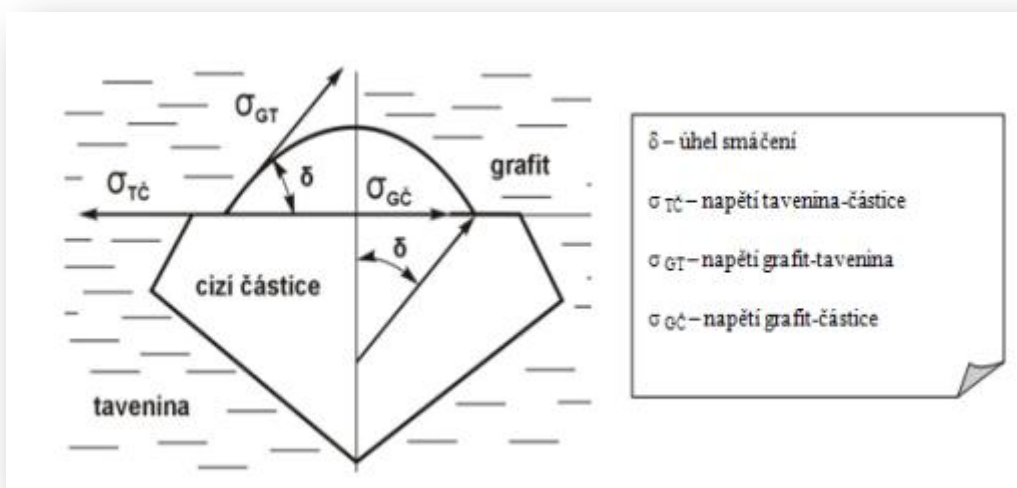
Prvky, které ovlivní grafitizační schopnost litiny jsou uhlík a po něm je největším grafitizátorem křemík. Dnes se tedy používají očkovadla na této bázi. Samotný proces očkování je složitou reakcí, která může být ovlivněna mnoha faktory.

Zásady správného očkování:

- dodržení chemického složení taveniny
- použití vhodného očkovadla
- dodržení potřebné teploty
- očkovat podle způsobu zpracování taveniny
- podle množství zpracovávané taveniny
- podle použití hotového odlitku

Jak bylo zmíněno, jedná se o vnesení cizí částice do taveniny, která musí splňovat určité podmínky:

- očkovadlo musí mít stejnou krystalickou mřížku, nebo alespoň dodržet jeden rozměr z parametrů krystalické mřížky, jako má grafit (šesterečná hexagonální), povolená odchylka je $\pm 5\%$
- dále musí být smáčeno taveninou, čím více je očkovadlo příbuzné krystalické mřížce tím získáme menší úhel smáčení a větší aktivitu vneseného zárodka (obr. 2.1). Úhel smáčení δ na mezifázovém rozhraní tavenina – cizí zárodek – zárodek grafitu musí být menší, než 180° . V tom případě se cizí zárodek podílí na grafitizaci. Při větším úhlu smáčení, než 180° ke grafitizaci nedochází. [1, 4, 8]



Obrázek 2.1: Vliv mezifázového napětí na krystalizaci grafitu na vnesené částice. [1]

2.2.1 Princip očkovaní

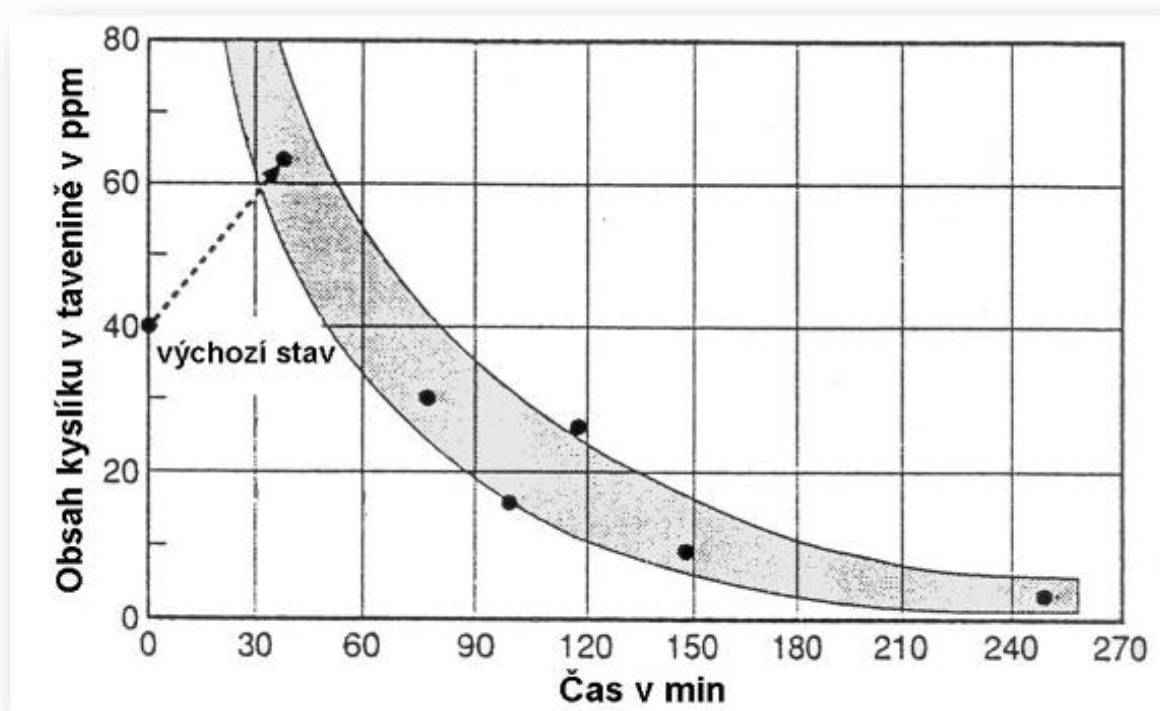
Jak uvádí literatura [1], lze vzniklé hypotézy očkovaní rozdělit do těchto skupin:

- *fyzikálně chemická podstata očkovaní*, tj. úloha povrchového napětí taveniny, krystalické stavby očkovací látky a příbuznost základních parametrů krystalické mřížky
- *termodynamická podstata očkovaní* a s ní související podstata homogenní a heterogenní nukleace (zárodkování), tvorba oxidů, případně dalších sloučenin, tvořících heterogenní zárodkovou fázi
- *ostatní hypotézy* definují stav taveniny před očkováním a v jeho průběhu, aplikují poznatky z fyzikální chemie a termodynamiky

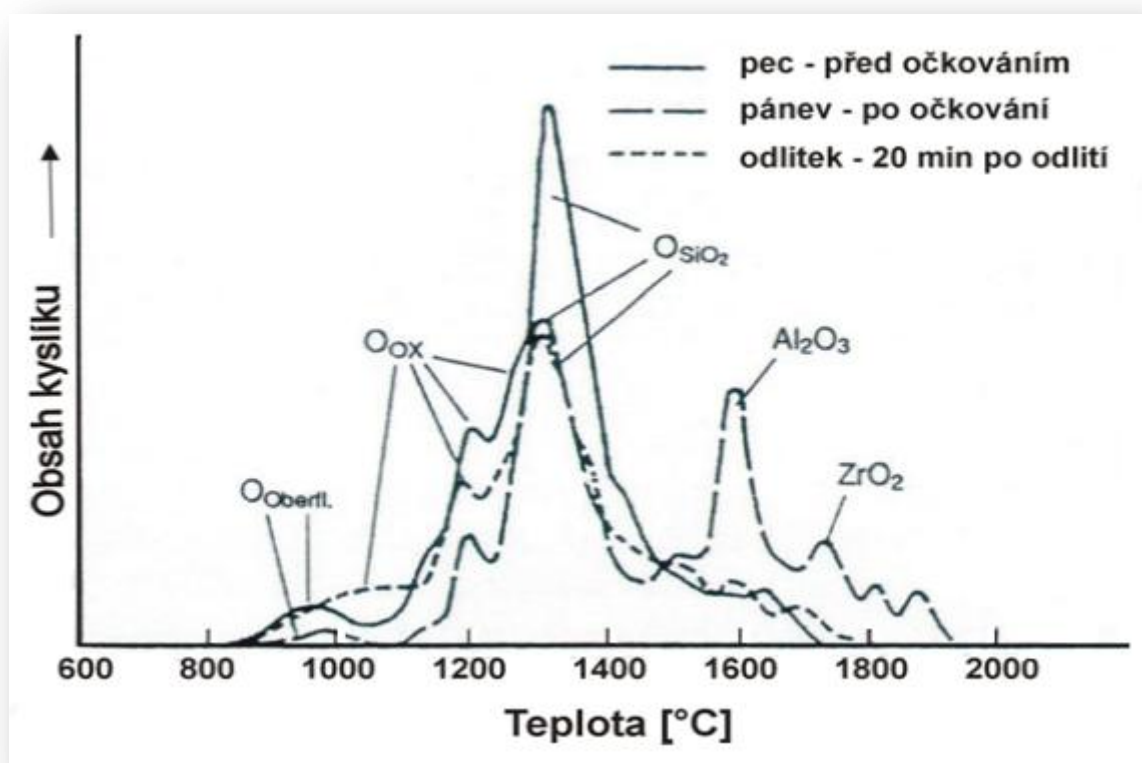
Při očkování je důležitý vliv kyslíku. V tomto směru byly realizovány řady výzkumných prací, které v podstatě udávají závislost stability vzniklých oxidů s ohledem na přítomnost prvků s vysokou afinitou ke kyslíku, přičemž se sleduje závislost teploty taveniny a výdrže na teplotě tavení s ohledem na technologické podmínky tavení.

Vznik oxidů je důležitý pro heterogenní nukleaci, ovšem na vzniklé oxidy negativně působí vysoká teplota přehřátí, při které dochází k desoxidaci taveniny a také ke snížení počtu zárodků grafitu. Na množství kyslíku v tavenině má tedy největší vliv teplota roztaveného kovu, a doba výdrže na teplotě (obr. 2.2). Problém se řeší, až tří stupňovým očkováním: pec-pánev, pánev-licí pánev, licí pánev-forma. Princip spočívá v rozdělení očkovačla mezi jednotlivé oblasti. V poslední fázi se očkovačla použije nejméně, což nám zaručí rovnoměrný očkovací účinek. [1,12]

S teplotou obsah kyslíku nejdříve stoupá, a svého maxima dosahuje při teplotě 1450 – 1480 °C, poté obsah kyslíku v důsledku reakce $[C] + (O) = (CO)$, klesá. Obsah kyslíku se mění také podle prostředí výskytu taveniny – pec, pánev, odlitek.



Obrázek 2.2: Vliv doby tavení na úbytek kyslíku (teplota výdrže 1290°C). [1]



Obrázek 2.3: Změny obsahu kyslíku v peci před očkováním, v pánvi po očkování a po odlití. [1]

Na obrázku 2.3 můžeme vidět, výskyt oxidů jednotlivých fází při odlévání. Je patrné, že v peci se tvoří oxidy křemíku SiO_2 , poté při očkování v pánvi vznikají oxidy hlinité Al_2O_3 společně se ZrO_2 . Po odlití do formy dochází ke snížení obsahu oxidů, a proto očkovací efekt končí odlitím taveniny do formy.

2.2.2 Metody očkování

Momentálně máme několik způsobů, jak očkovat roztavenou taveninu. Záleží na způsobu očkování (do pánve, do proudu kovu.), a také jaké máme podmínky ve slévárně (technologie lití). Tavenina musí být na očkování „připravena“. Jak uvádí autor [4]: Vedení tavby je dané vsázkou, druhem tavícího agregátu, výduskou (kyselá, zásaditá), teplotním režimem. U očkování litiny je typické „tvrdé“ natavení, tzn. mateřská, výchozí tavenina má mít obsah C a Si v dolním pásmu.

Očkovadla dělíme:

- **granulovaná očkovadla:** zde záleží na velikosti granulátu, podle množství taveniny od 0,2 mm po 8 až 10 mm, tento způsob je jeden z nejčastěji používaných
- **kompaktní tělíska:** ta jsou v podstatě vložena do procesu samotného lití a to buď přímo do lící jamky, pod vtokový kůl, nebo do reakční komůrky (použití u odlitků vysoké hmotnosti) ve vtokové soustavě
- **plněné profily:** umožňují automatizaci očkování, máme přesně nastaveno, kolik plněného profilu se posune směrem do taveniny, toto očkování probíhá přímo do proudu kovu (jeho nevýhoda je vyšší cena)

Množství, druh a velikost očkovadel se vždy volí, podle množství zpracovávaného kovu, v závislosti na lící teplotě, způsobu očkování a druhu odlévaného materiálu. Množství očkovadla se obvykle pohybuje okolo 0,1 až 1,2 % na hmotnost tekutého kovu, ale nelze jej předepsat, jde vždy o prověřené obsahy z praxe, každá slévárna si je určí podle vlastní potřeby. [1,10]

Způsoby očkování můžeme rozdělit takto:

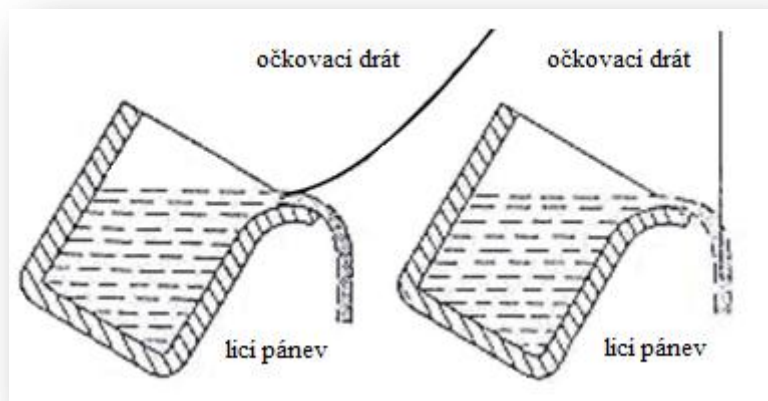
- **očkování v pánvi:** při použití tohoto způsobu, je nutné naplnit pánev určitým množstvím roztaveného kovu, abychom zabránili „přichycení“ očkovačla na dno pánve, čímž by se snížila jeho účinnost, na druhou stranu není dobré ani vhození očkovačla do pánve příliš plné (očkovačlo by se nemuselo v tavenině rozpustit). Či se očkovačlo umístí na žlábek tavící pece při vylévání taveniny. Oba způsoby jsou finančně nenáročné.

Zrnitost očkovačla se volí podle teploty a zejména podle objemu kovu, od 2-4 mm u malých pánví, do 30 i více mm u pánví velkých. Frakce pod 1mm se nemají používat, neboť je nebezpečí jejich nalepování na stěny pánve a obalení do strusky. [2] Problém, který v tomto případě u očkování nastává je inkubační perioda, a to její snížení, což má za následek snížení očkovacího efektu. Časový interval, který je nutno po přidání očkovačla, až po odlití formy dodržet, je stanoven cca na 20 minut.

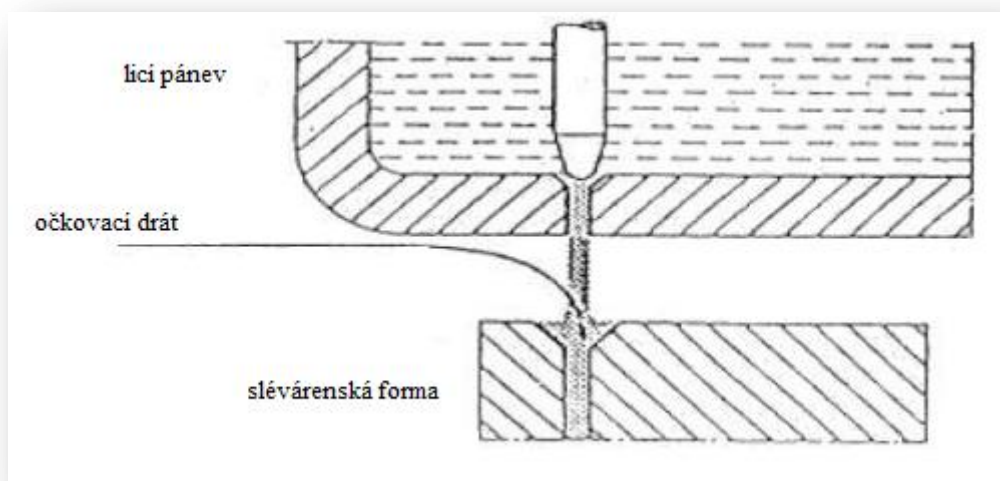
- **očkování do proudu kovu:** používá se zejména při odlévání pomocí automatických licích zařízení (tzv. injektáž). Očkovačlo s malou zrnitostí kolem 1mm je kontinuálně dávkováno buď přímo do proudu kovu, nebo do mezipánve po celou dobu lití formy. Ovládání dávkovače, bývá spřaženo s odlévacím zařízením. Metoda je přesná v dávkování očkovačla a investičně středně náročná. [2]

Dalším důležitým faktorem při očkování je konstrukce odlitku. Tvarově složité a hlavně tenkostěnné odlitky mohou způsobit, že se očkovačlo nerozloží v celém objemu taveniny při odlévání. Proto věnujeme pozornost vtokové soustavě, při vhodné konstrukci zajistíme rovnoměrné plnění dutiny a tím se rozpuštěné očkovačlo rozdělí požadovaně v odlitku.

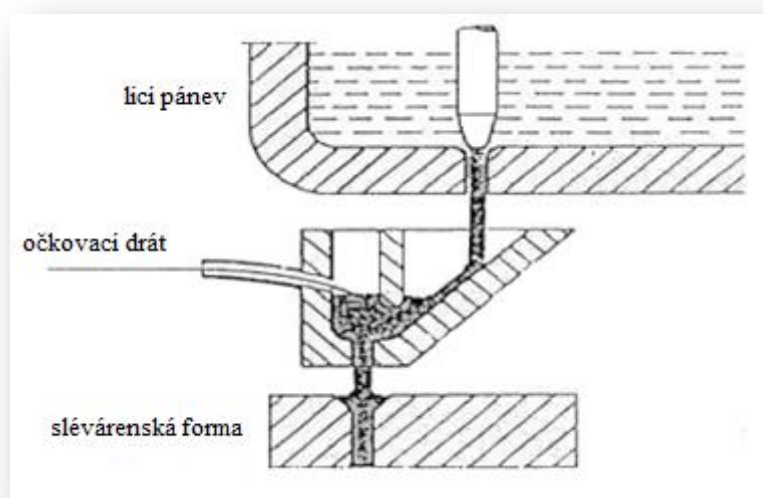
- Schémata způsobu očkování vidíme na obrázku 2.4, 2.5, 2.6 a 2.7.



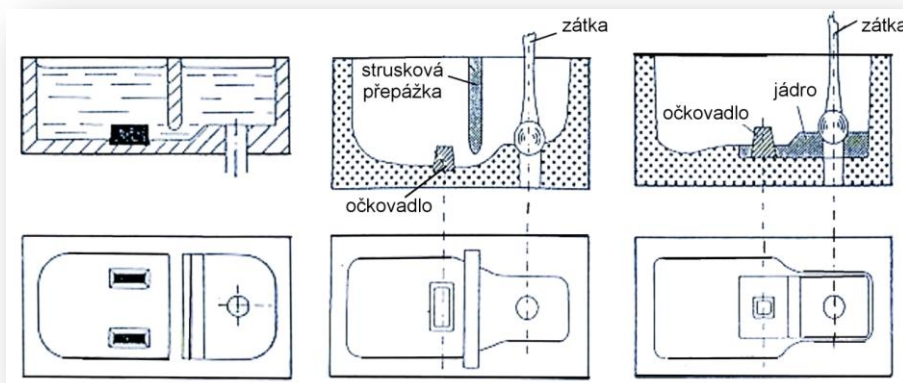
Obrázek 2.4: Očkování plněným profilem v pánvi a do proudu kovu. [1]



Obrázek 2.5: Očkování plněným profilem do proudu kovu, při odlévání. [1]



Obrázek 2.6: Očkování plněným profilem do mezipánve, při odlévání. [1]



Obrázek 2.7: Očkovaní pomocí kompaktních, či granulovaných očkovadel přímo do vtokové jamky. [1]

2.2.3 Kontrola očkovaní

Očkovací účinek kontrolujeme pomocí:

- **zákalkové zkoušky:** nejvhodnější způsob zjištění efektu očkovaní v provozu, tavič provede tuto zkoušku odlitím „zákalkové zkoušky“ a dovede posoudit efektivnost očkovacího procesu okamžitě. Záleží na výšce zákalky, čím je vyšší, tím se vytvořilo v tavenině méně grafitizačních zárodků.
- **křivky ochlazování:** použijeme *termickou analýzu*, díky které vyhodnotíme teploty a tvary křivek v oblasti eutektika. Různé změny křivek ochlazování, dokumentují vznik nových fází. První výdrž na teplotě je na teplotě likvidu při vyloučení primárního austenitu. Informace o účinku očkovaní na krystalizaci zárodků získáme z průběhu křivek chladnutí v oblasti eutektické přeměny, tzn. čím menší je rozdíl mezi rovnovážnou teplotou stabilního eutektika a naměřenou teplotou eutektické přeměny, tím je vyšší obsah grafitizačních zárodků v tavenině. [4]

Pravidlem je, že čím účinnější je očkovaní, tím menší je přechlazení pod rovnovážnou teplotou a delší eutektická prodleva. Křivky chladnutí nám také zobrazí postupné odeznění očkovacího účinku.

- **počtu eutektických buněk:** ten určíme pomocí tzv. *metalografického hodnocení* struktury odlitku. Metoda vyhodnocení je časově nejnáročnější a nelze ji provést přímo v provozu slévárny. Užívá se až následně po odlití, ale jedná se o zkoušku velice přesnou.

2.2.4 Vady způsobené nesprávným očkovaním

Jak uvádí autor [2], nesprávným použitím očkovaadel mohou vznikat některé vady v odlitku:

- **plynové dutiny:** očkovaadlo nevhodného složení, vlhkost, dusík v očkovaadle.
- **vměstky z nerozpuštěného očkovaadla:** příliš velká zrnitost očkovaadla, nízká teplota kovu, nevhodná technika očkování.
- **struskové vměstky:** přeočkování, nízká teplota, nevhodný způsob očkování, nevhodné složení očkovaadla.
- **flotace grafitu:** nízká teplota, přeočkování.
- **staženiny a řediny:** druh očkovaadla, přeočkování (příliš vysoký počet eutektických buněk).

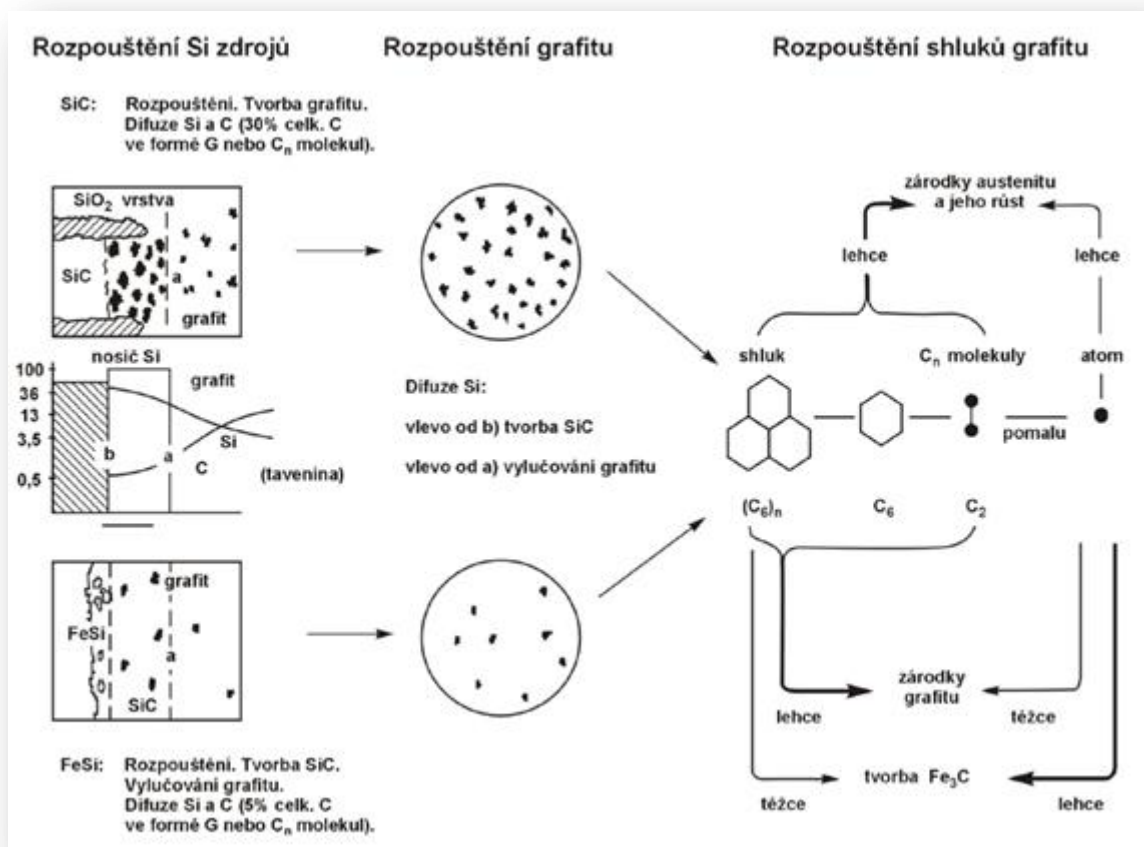
S výše zmíněnými problémy souvisí také skladování očkovaadel. Vzhledem k atmosférické vlhkosti, která nepříznivě působí, očkovaadla oxidují a ztrácejí své očkovací vlastnosti. S tímto jevem také souvisí vytváření většího množství strusky a vyskytují se problémy s vytvořením plynových dutin. Je tedy důležité, aby se očkovaadla skladovala v uzavřených prostorech. Nejlépe v kontejnerech, nebo sudech bez přístupu vzduchu.

2.2.5 Složení a druhy očkovaadel

Očkovaadlo se dá rozdělit na dvě složky a to tzv. **nosič** a **krystalizačně aktivní složku**. Nosič tvoří hlavní část hmoty očkovaadla, musí zvyšovat aktivitu uhlíku v tavenině. Druhá složka-krystalizačně aktivní je v menším množství, ale pro účinnost očkovaadla je nezbytná. Aktivními prvky jsou zejména Ca, Al, Sr, Ba nebo Zr, reagují zejména s kyslíkem a sírou, tvoří s nimi sloučeniny s vyšší teplotou tuhnutí, než má litina a slouží jako nukleační zárodky grafitu. Zárodky pro nukleaci grafitu jsou tvořeny jádrem, na jehož povrchu je vrstva oxidů aktivních prvků a křemíku. Na této vrstvě krystalizuje grafit.[1] Očkovaadlo snižuje rozpustnost uhlíku v železe a zvyšuje vylučování grafitu (volného uhlíku, na úkor vázaného).

Druhy očkovaadel:

- **ferosilicium FeSi75:** očkovaadlo na bázi křemíku je nejvhodnějším očkovaadlem slitiny Fe-Si. Obsahy 65-75% Si a 1-2% Al, 0,2-1% Ca. Po přidání FeSi75 dochází k desoxidaci taveniny, a vznikají tuhé částice SiO_2 , to jsou v podstatě heterogenní zárodky. Pro reakci je potřebné dostatečné množství kyslíku v tavenině, při použití očkovaadla vzniká *chemická heterogenita*, a je podpořen proces nukleace grafitu a to tak, že se v místě s větším obsahem křemíku zvýší aktivita uhlíku.
- **karbid křemíku SiC:** nejedná se o typické očkovaadlo s krátkodobým účinkem a doznívacím efektem, používá se jako tzv. předočkovaadlo. Je vysoce účinný ve tvorbě zárodků grafitu. Má dlouhodobý účinek a může být součástí tuhé vsázky. Problémem je vysoká teplota tavení, proto se hůř rozpouští a může zhušťovat strusku. Karbid křemíku má tavicí teplotu nad 1700°C . Obsahuje obvykle 85-90% SiC. V litině se netaví, nýbrž postupně rozpouští. Tím se zárodky tvoří postupně po delší dobu a očkovací účinek je dlouhodobý. Rozpouštění SiC má na rozdíl od FeSi (obr. 2.8) endotermický charakter, což zvyšuje stabilitu zárodků i při vyšších teplotách. Potvrdilo se, že očkování pomocí SiC je účinné i v krystalizačně nepříznivých podmínkách, např. při vysokém podílu oceli ve vsázce, nebo při tavení pouze ocelového šrotu. Dávkování SiC je kolem 0,5%. [1, 4, 8]



Obrázek 2.8: Porovnání očkovacího efektu FeSi75 a SiC. [1]

Z obrázku 2.8 vyplývá, že rozdílné použití očkovaadel má vliv na tvorbu grafitizačních zárodků. Při použití karbidu křemíku dochází k vyloučení většího počtu zárodků postupným rozpouštěním a tím získáme delší očkovací účinek. Oproti tomu použití ferosilicia vede k vyloučení menšího počtu zárodků a tím k menšímu očkovacímu efektu. Samozřejmě záleží na dalších parametrech, jako je teplota, doba lití a způsob dávkování.

V současné době je nabízen široký sortiment očkovaadel přehled vidíme v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Příklady složení očkovaadel. [4]

Očkovadlo	Obsah základních prvků, % (Fe zbytek)	Poznámka
Zlievár. FeSi 75%	min.68 Si, max.0,5 Mn, max.1,7 Al, max.0,4 Cr	OFZ Istebné
SIMANCAL	Si 70-75, Mn 2-4, Ca 0,8-2, Al 1-2	OFZ Istebné
Foundry-Grade 75	Si 75±2, Al max.1,25, Ca 0,8±0,2	ELKEM
Foundrysil 75	Si 75±2, Al max.1,25, Ca 1,0±0,25, Ba 1.0±0,25	ELKEM
Superseed 75	Si 75±2, Al max.0,5, Ca max.0,1, Sr 0,8±0,2	ELKEM
Zirconic	Si 75±2, Al 1,25±0,25, Ca 2,25±0,25, Zr 1,55±0,25	ELKEM
Inogen 75	Si cca. 75, Al+Ca cca.2,5	SKW
Inoculoy 63	Si 60-65, Mn 7-12, Ca 1,5-3, Ba 4-6, Al 1-1,5	SKW
Optinoc Z	Si 73-78, Zr 1,2-2,0, Ca 1,5-3,5, Al 1,2-2,2	SKW
SB 5	Si 64-70, Ba cca. 2, Al cca. 1,5, Ca cca. 1	SKW
Inoculin 25	Si cca.65, Zr cca.5, Ca cca.1,3, Mn cca.3,5, Al cca.1,3	FOSECO

2.2.6 Doznívací účinek očkovadla

Největšího očkovacího účinku dosáhneme hned po vnesení očkovadla do taveniny. S časem dochází k poklesu jeho grafitizační schopnosti. Rychlost odeznívání účinku může být vysoká a výrazně se může snižovat zejména v prvních minutách po očkování. Účinek očkovaadel odeznívá vždy, rozdíl je v rychlosti odeznívání.

Obecně platí:

- Maximálního účinku očkovadla získáme, jestli kov odlijeme co nejdříve po přidání očkovadla.
- Očkovadlo, které vytváří nejvíce eutektických buněk, nemusí být nejúčinnější při snižování zákalky.
- Účinnost očkovadla nezjistíme podle jeho složení, a jeho působení se může lišit podle chemického složení litiny, hlavně s nízkým obsahem síry.

Efekt odeznívání účinku očkování se projevuje:

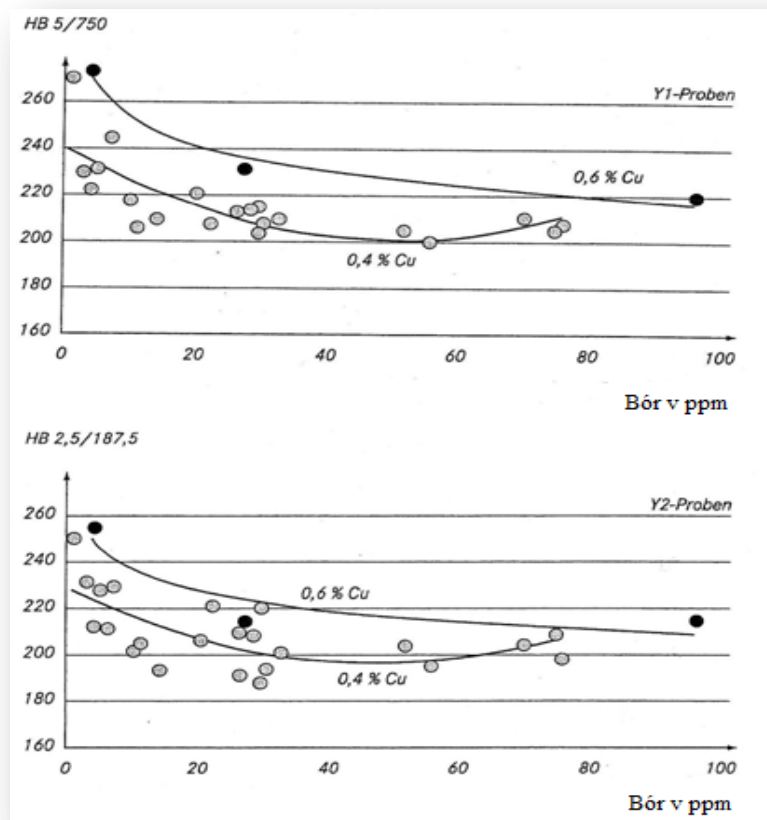
- Zvětší se podchlazení při eutektickém tuhnutí, litina s lupínkovým grafitem má větší sklon k tvorbě zákalky.
- U LLG se snižuje počet eutektických buněk, tím dochází ke zhoršení mechanických vlastností, u LKG se sníží počet kuliček grafitu a dojde k nedokonalosti jejich tvaru, což opět sníží mechanické vlastnosti litiny.

Rychlé odeznívání očkovacího účinku a skutečnost, že stále více sléváren používá udržování taveniny na teplotě v peci, zdůrazňuje význam očkování do proudu taveniny. Pro udržovací a licí zařízení je to fakticky jediná možnost očkování. [14]

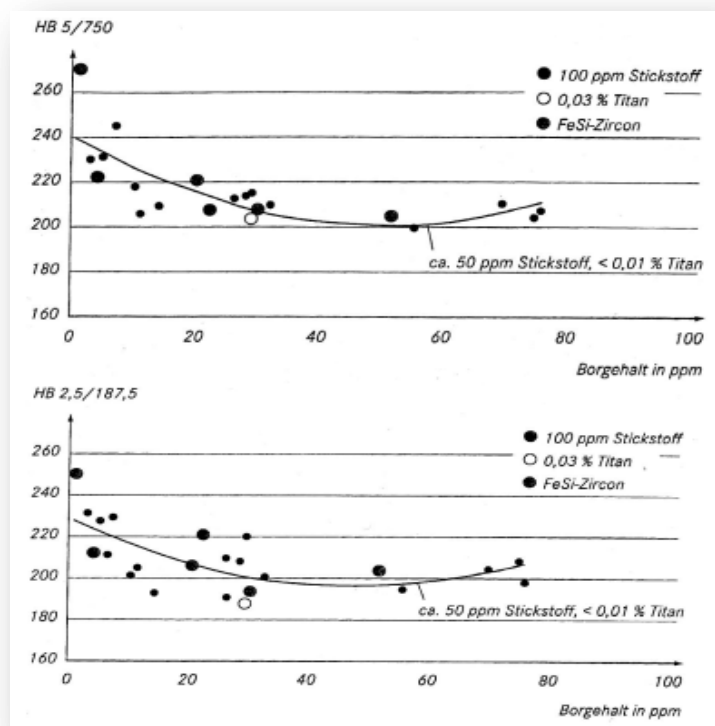
2.3 Vliv bóru

Bór se může vyskytovat v surovém železe až do 0,002%. [5] Očkovací účinek bóru na mikrostrukturu litin byl studován Wernerem Bauerem v rakouském Giesserei-Institut v Leobenu.[13] Získané poznatky ukazují, že již malé obsahy bóru mohou utvářet feritické struktury v LKG, tentýž efekt byl prokázán také u LLG, tudíž se bór v mnohých slévárnách používá jako vsázkový materiál a při tavení je jeho obsah průběžně kontrolován. Při obsahu bóru 10 ppm, dochází ke zvýšení množství feritu v matrici, při obsahu nad 20 ppm se však, již ferit v litině netvoří. Bór může v tavenině vytvářet bornitrid (působením dusíku), který má nepřímý urychlující efekt na zvýšení počtu kuliček grafitu, či přímou cestou podporuje tvorbu feritu. V případě, že chceme tvoření bornitridu zabránit je doporučeno použít Ti, který má vyšší afinitu k dusíku než bór. Bylo prokázáno, že pomocí Na_2O , NaC, nebo vnesením 2% sody do taveniny, snížíme obsah bóru a můžeme jej udržet na požadované hodnotě. V praxi se bór používá k výrobě litin označovaný jako „sibodur“, jde o feriticko-perlitickou LKG, která má vysoký obsah bóru a křemíku.

Při pokusech Giesserei-Institut v Leobenu, byly vyrobeny odlitky z LKG při obsahu bóru do 100 ppm. První fáze tavení byla s nižším obsahem bóru, následně byl přidán ferobor. Požadovaný obsah bóru byl z části dodán již ve vsázce pomocí legujících materiálů. Obsah Cu byl okolo 0,4% – 0,6%. Tvrdost se do obsahu 50 ppm bóru snižuje o přibližně 40 HB a potom se mírně zvyšuje (obr. 2.9 a 2.10). Zvýšením obsahu Cu z 0,4% na 0,6% zredukovali úbytek tvrdosti litiny způsobený bórem. [13]



Obrázek 2.9: Tvrdost dle Brinella v závislosti na obsahu bóru. [13]



Obrázek 2.10: Tvrdost dle Brinella v závislosti na obsahu bóru, při obsahu 0,4% Cu, není zvýšen obsah Ti, Zr, N. [13]

2.3.1 Studium mikrostruktury

Provedené rozbory, kde bylo použito od 13 ppm, nebo 29,48 ppm B, ukázaly větší koncentraci bóru na hranicích zrn a zvýšený počet zrn grafitu v LKG. Výsledky dvou měření, ukazují, že obohacení bórem je pod povrchem částice kuličkového grafitu od 2-5 mikrometrů. Maximum je od 0,0006-0,14% (což je od 570-1400ppm). V matrici nebyl bór prokázán, nebo byl pod prokazatelnou hranicí, podle institutu nelze zjistit obsah bóru při takto malých koncentracích.

2.3.2 Studium eutektoidní transformace pomocí DSC měření

Při zkouškách s různými obsahy bóru byla zkoumána změna eutektoidu pomocí DSC měření, po 1h austenitizace při žhání na 900 °C a různými způsoby ochlazování odlitků. Bór způsobuje tvorbu feritu v litém stavu, při zkouškách DSC (tepelného zpracování) byl tento mechanismus působení jiný. Stoupající obsah bóru vyvolával tvorbu perlitu. Zatímco začátek předeutektoidní přeměny tvoření feritu byl ovlivněn minimálně. Na povrchu grafitu se vyskytla obohacená místa bórem. Výsledky ukazují, že rozložení bóru mezi grafitem a ZKH má návaznost. Bylo zjištěno, že bór se vyskytuje na povrchu částic grafitu i po tepelném zpracování.

2.3.3 Působení bóru

Podeutektická šedá litina (GJL) byla vyrobena v středofrekvenční indukční peci s kyselou vyzdívkou. Po očkování 0,3% FeSiAlCa byly odlity zkušební tyče o průměru 30 mm s obsahem bóru podle použitých vsázkových materiálů. Po přidání feroboru byla odlita další zkušební tyč (stejného průměru). Následná druhá a třetí tavba byly nataveny z vratného materiálu z předešlých taveb, takže obsah bóru v nich byl zvýšen z 5 ppm na přibližně 60 ppm. Mechanické a strukturní vlastnosti takto vyrobených litin jsou v tabulce 2.2. Se zvýšeným obsahem bóru klesá tvrdost a pevnost v tahu, až o 15% pod očekávané hodnoty. [13]

Tabulka 2.2: Mechanické a strukturní vlastnosti litin v závislosti na chemickém složení odlitých zkušebních tyčí o Ø 30 mm. [13]

	Obsah prvků %						Univerzální vlastnosti 30mm tyče				
	C in %	Si in %	Mn in %	P in %	S in %	Sc	B in ppm ³⁾	R _m in MPa	HB 10/3000	R _m 30 in Mpa ⁴⁾	Ferit in %
1	3,25	1,73	0,55	0,033	0,050	0,878	5	301	200	291	0
							18	291	193		Spuren
2	3,26	1,87	0,41	0,031	0,040	0,891	16	256	180	281	2
							38	233	174		4
3	3,29	1,92	0,61	0,032	0,042	0,903	37	243	172	271	4
							59	233	171		3

2.3.4 Reakce bóru při tavení v indukční peci

Bór vyhoří (oxiduje) při tavení oceli z vratného materiálu obsahujícího B, ale to neplatí pro litiny, protože i nízké koncentrace křemíku v litině chrání bór před propalem.

V kyselé středofrekvenční indukční peci, byly provedeny tři tavby ze surového železa s nižším obsahem Si, při obsahu od 0,1 do 0,25% Si. Při zkouškách byly taveniny udržovány na teplotě 1310-1350 °C, po přidání feroboru.

V první litině, která byla prakticky bez Si (C= 3,99%; Si = 0,02%; B = 42 ppm), byl propal bóru stejně rychlý jako v oceli (pokles koncentrace bóru z 45 na 5 ppm).

V druhé litině (C= 4,01%; Si= 0,25%; B= 40 ppm) s 0,25 % křemíku byl pokles obsahu bóru (jeho propal) podstatně menší (pokles z 40 jen na 21 ppm).

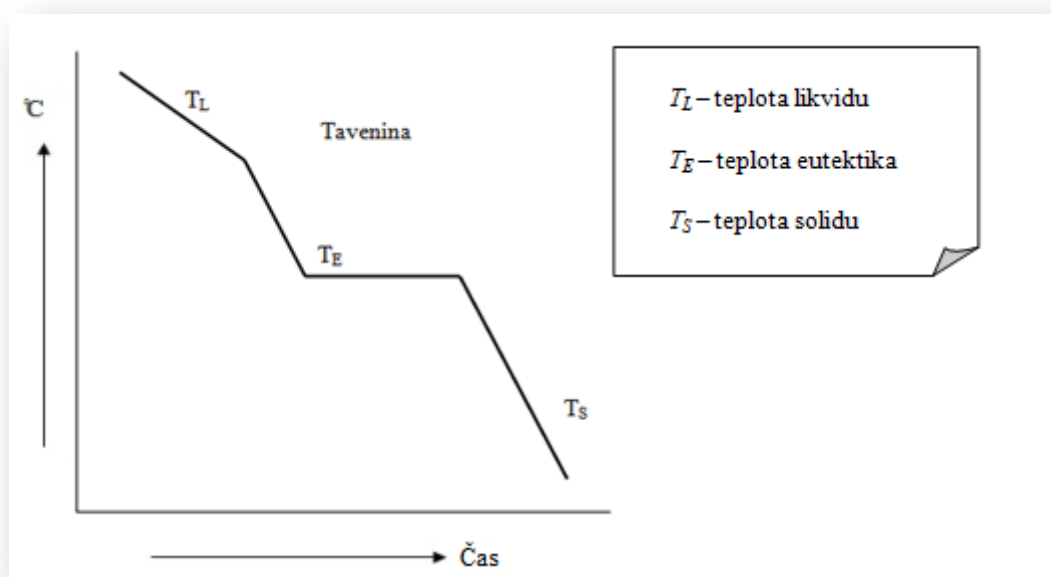
Třetí tavba byla kombinací první a druhé. Výchozí složení litiny bylo C= 4,29%; Si= 0,03% a B= 19 ppm. Po 20 minutách tavení byl obsah B jen 7 ppm. Bez přítomnosti křemíku tedy bór rychle vyhořel. V průběhu dalšího vedení tavby byl doplňován úbytek uhlíku i křemíku. Nauhličení: + 0,3% C, zvýšení obsahu křemíku: + 0,4% FeSi75 a přidání bóru na obsah B= 38 ppm. Z výchozího obsahu a po navýšení C, Si a B v průběhu tavby (na C= 4,05%; Si= 0,26% a B= 38 ppm) byl po dalších 20 min. tavení konečný obsah: C= 4,05%; Si= 0,16% a B= 28 ppm. Při takto vedené tavbě byl propal bóru nejmenší. Už desetina křemíku snižuje propal bóru – viz příloha 1.

Dále byla tavena litina s kuličkovým grafitem (GJS) z vsázky s typickým obsahem bóru 25 ppm. Přidáním dusíkatého vápna do taveniny byl v litině zvýšen obsah dusíku na 130 ppm. V důsledku tohoto zásahu se obsah bóru v průběhu tavby nezměnil (nesnížil) a nebylo prokázáno tvoření nitridů boru v litině.[13]

Po odlití se v litině tvoří ferit, až do obsahu 50 ppm bóru a snižuje se podíl perlitu i tvrdost. Přidáním mědi, při větším obsahu bóru roste podíl perlitu a tvrdost, ale konečné hodnoty tvrdosti jsou nižší v přítomnosti bóru.

2.4 Krystalizace litin

Krystalizace je změna z tekutého do pevného skupenství doprovázená vznikem krystalů. Na obrázku číslo 2.11, vidíme křivku chladnutí litiny, při které dochází ke krystalizaci. Krystalizace probíhá primární (přímo z taveniny) a to mezi teplotou likvidu a solidu, krystalizaci nazýváme tuhnutím. V této fázi je ovlivňován tvar a složení grafitu.

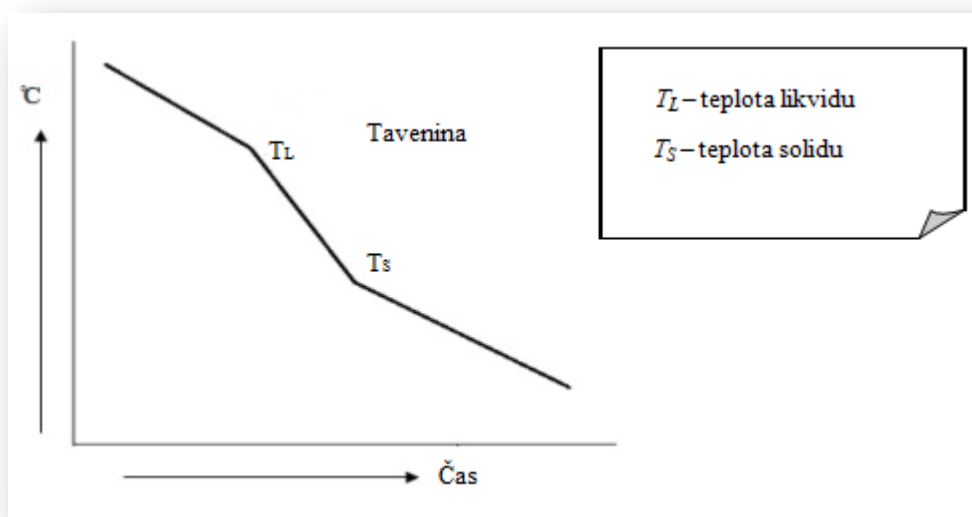


Obrázek 2.11: Křivka chladnutí litiny.

Dále probíhá sekundární krystalizace, a to mezi teplotou solidu a teplotou okolí, krystalizaci nazýváme chladnutím. Krystalizace všech typů litin, začíná vyloučením a růstem krystalu austenitu, pro aktivizaci jeho zárodků je nutné relativně malé podchlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu. [1, 6, 3, 9]

Při krystalizaci litin vzniká konečná struktura odlitků a formuje se při eutektické reakci (723°C). Konečná struktura se dělí na: ZKH (základní kovová hmota) ferit, perlit s dalšími strukturními složkami, a na vysokouhlíkovou fázi: grafit, cementit (popř. ledeburit). Je rozdíl mezi krystalizací ocelí a litin, protože litina krystalizuje dvěma způsoby a to buď: metastabilně-vyloučením vysokouhlíkové fáze ve formě cementitu (bílá litina), nebo stabilně, kdy se stejná fáze vyloučí ve formě grafitu (šedá litina). V případě, že se vyloučí obě fáze, nazýváme litinu makovou. [1, 4, 11]

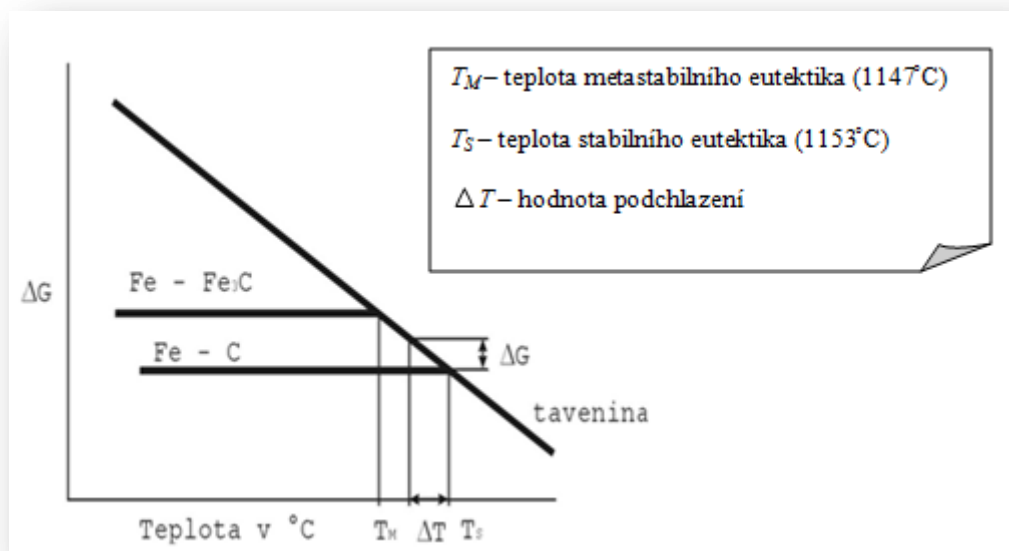
Ocel krystalizuje mezi $T_L - T_S$, bez prodlevy (obr. 2.12), oproti tomu litina krystalizuje s prodlevou, při které se tvoří eutektikum (eutektická buňka, která má vzhled podle podmínek grafitizace v souvislosti se změnou tvaru grafitu: lupínkový-červíkovitý-kuličkový), ve kterém je v rovnováze tavenina a tuhá fáze tvořená austenitem a grafitem, nebo cementitem [1].



Obrázek 2.12: Křivka chladnutí oceli.

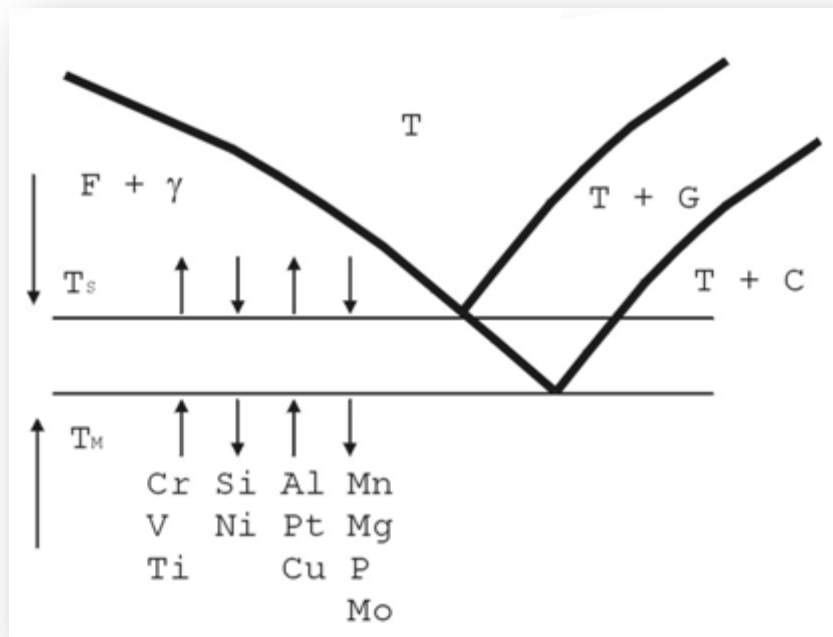
Díky eutektické reakci nastává delší krystalizační pásmo, růst eutektika závisí na termodynamických a kinetických podmínkách krystalizace, které jsou dány volnou změnou energie metastabilní, či stabilní soustavy při krystalizaci. Stabilní aktivace zárodků grafitu, nepotřebuje vysokou hodnotu ΔG (volné energie, obr. 2.13).

Vylučování grafitu nastává již při nízkém stupni podchlazení ($8 \div 10^{\circ}\text{C}$). Pokud je hodnota podchlazení vyšší, než je metastabilní teplota, nedojde k vylučování grafitu.



Obrázek 2.13: Vliv podchlazení na krystalizaci litiny. [1]

Cyklus mezi stabilní a metastabilní teplotou rozhoduje o grafítizační schopnosti taveniny, a je ovlivňován dalšími prvky přítomnými v litině, které rozšíří interval teplot T_S a T_M grafítizaci podporují, nebo naopak, což vidíme na obrázku č. 2.14.



Obrázek 2.14: Ovlivnění teploty přítomnými prvky v litině. [1]

Dalším důležitým faktorem působícím na krystalizaci litin je chemické složení litiny, které působí na aktivitu uhlíku (a_c) v litině. [10] Působení třetího prvku vypočteme: e_c^x, r_c^x .

➤ **Prvky působí ve dvou skupinách:**

- 1) karbidotvorné prvky (Zr, Ti, V, Mo, Cr, W, Mn), které zvyšují rozpustnost uhlíku a tím snižují jeho aktivitu při krystalizaci
- 2) grafitotvorné prvky (Si, Al, P, Cu, Ni, Co), které naopak snižují rozpustnost uhlíku a jeho aktivitu zvýší

Dále změnu aktivity uhlíku sledujeme podle:

$$C^x = m \cdot x$$

C^x – změna rozpustnosti C v %

m – koeficient působnosti prvků x na aktivitu C

x – koncentrace prvků x %

Z tohoto vztahu můžeme určit získaný obsah uhlíku v eutektiku, díky tomu zjistíme stupeň eutektičnosti S_e , podle kterého určíme o jaký typ litiny, podle obsahu uhlíku jde. [4, 5]

$$S_e = \frac{C}{4,26 - 0,3 (Si + P)} = > 1, = 1, < 1.$$

Obsah uhlíku: >1 – nadeutektická litina, $=1$ – eutektická litina, <1 – podeutektická litina.

Podle procent uhlíku: Podeutektické litiny – do 4,3% C, zde se primárně vyloučí austenit (zpravidla ve formě dendritů). Eutektické litiny = 4,3% C, vzniká austenit, grafit a ledeburit současně. Nadeutektické litiny – nad 4,3% C, u tohoto typu vzniká vysokouhlíková fáze (primární cementit, grafit).

U LLG je čas krystalizace eutektika závislý podle obsahu uhlíku v litině, z čehož vyplývá, že čím nižší obsah uhlíku je tím menší růst grafitizačních zárodků a menší množství eutektika. Při vylučování eutektika dochází k ovlivňování grafitizační schopnosti litiny.

Je důležité určit, jakým způsobem bude litina krystalizovat, tzn., jaké má grafitizační schopnosti - jak bude uhlík přítomný v tavenině aktivním grafitizátorem.

➤ **Průběh grafitizace:**

Při krystalizaci LLG je grafit obklopen z části austenitem a konce lamel jsou ve styku s taveninou, viz obrázek 2.15. LLG, proto roste v podélném směru lupínek grafitu rychleji než v příčném, kde uhlík difunduje do lupínku přes austenit. Krystalizace je závislá na obsahu uhlíku, čím je C v litině méně má menší grafitizační schopnost a méně eutektika. Oproti tomu při krystalizaci LKG roste grafit stejnoměrně, uhlík se dostává ke grafitu difuzí skrze obal austenitu. Litina s kuličkovým grafitem má vysoké hodnoty uhlíku od 3,7 – 3,9% a tudíž je největší podíl krystalizační fáze tvořen eutektikem.



Obrázek 2.15: Vzhled eutektických buněk.

Máme dva způsoby grafitizace: [1, 4]

- přímá cesta: zárodkem grafitizace je uhlík, který zvyšuje aktivitu reakce směrem k zárodkování grafitu. Jde o homogenní nukleaci $C_{\text{roztok}} \rightarrow C_{\text{grafit}}$
- nepřímá cesta: grafit krystalizuje za vzniku cementitu a jeho následného rozpadu, kdy vznikají jiné zárodky a to karbidické, nitridické či oxidické, které podporují zárodky grafitu. Jde o heterogenní nukleaci $C_{\text{roztok}} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{Austenit} \rightarrow C_{\text{grafit}}$

Kinetika grafitizace – závislost počtu zárodků grafitu na teplotě, může být ovlivněna: **očkováním**, modifikací, legováním.

2.5 Modifikace

Modifikací působíme na změnu tvaru grafitu v průběhu krystalizace, tzn., že z tvaru lupínkového grafitu, za použití modifikátoru získáme tvar kuličkový. Litina s kuličkovým grafitem nabývá modifikací jiné užité, fyzikální (tepelná vodivost), technologické (korozivzdornost, možnost svařování a obrábění) a mechanické vlastnosti (houževnatost). LKG má vysoké pevnosti a můžeme ji dále tepelně zušlechťovat.

Máme tři teorie vysvětlující modifikační proces: [1, 8]

- při modifikaci dochází k vypařování hořčíku, který se dostává do atomárního stavu a absorbuje se na plochách stávajícího krystalu grafitu, čímž mění rychlost růstu krystalových ploch
- při modifikaci probíhá desoxidace, odsíření, odplynění taveniny – její rafinace a tím dochází ke změně fyzikálních vlastností taveniny a ovlivnění růstu grafitu
- při modifikaci se mění nukleací podmínky grafitizace, tzn., zvyšuje se podchlazení, mění se teplota a délka eutektické prodlevy

Změnu tvaru grafitu vyvoláme dvěma druhy přísad:

- modifikátorem na bázi Mg, Ce, díky němu získáme kuličkový tvar grafitu
- grafitizačním očkovadlem na bázi Si, který zajistí dostatečné množství aktivních zárodků v tavenině

Způsob použití modifikátoru je hlavním faktorem ovlivňující jeho složení, při výrobě LKG. Nejběžnějším modifikátorem je hutnický Mg (99,5% Mg), nebo jeho předslitina, která obsahuje od 5 – 35% hořčíku. Dalšími prvky ve slitině jsou Si, Ni, Cu a Fe v obsahu 40-55% (nosné prvky), a Ca, Al, Ce do 7%.

Použitím modifikátoru dochází k výraznému podchlazení taveniny, proto se následně očkuje grafitizačními přísadami, abychom tomuto podchlazení zabránili. Účinky modifikace a očkovaní mají limitující časové rozmezí, projeví se doznívací efekt.

Praktická část

3. Návrh metalurgie a technologie lití zkušebních odlitků

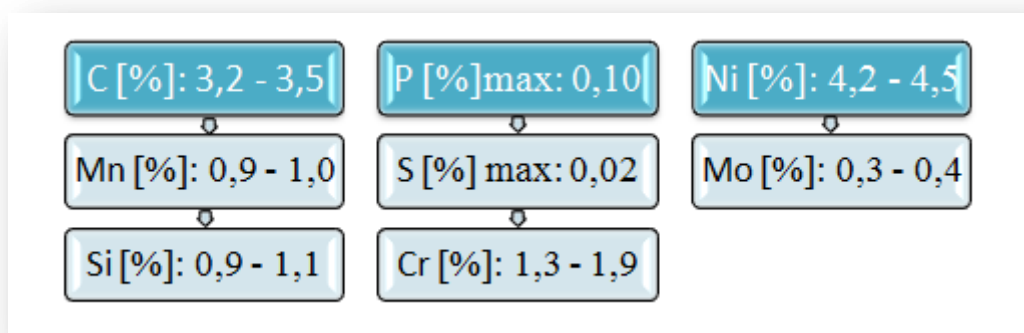
- **Metalurgické zpracování:** tavení materiálu s použitím očkování, modifikace, kvůli ovlivnění výsledné struktury odlitku, přesné popisy v každé tavbě.
- **Technologie lití:** gravitační odlévání do netrvalých pískových forem.

Nejprve bude představen tavený materiál – ICDP litina, poté bude následovat popis 7 vzorků, které byly odlity experimentálně ve Vítkovických slévárnách s.r.o. k porovnání s našimi experimentálními tavbami, kdy byly provedeny tři tavby, z nichž byly získány vzorky na metalografické hodnocení litiny. V závěru budou popsány získané výsledky.

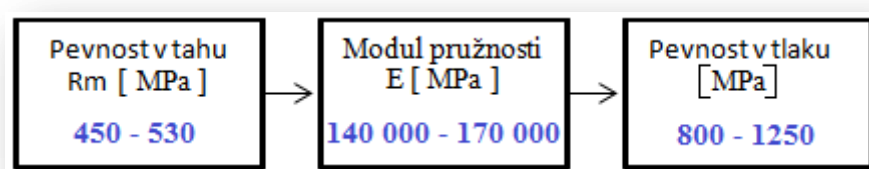
4. Provedení experimentálních taveb

Taveným materiálem je indefinitní litina ICDP, která se používá ve Vítkovických slévárnách na výrobu válců pro válcovací tratě. Materiál ICDP obsahuje 30 – 45% karbidů typu M_3C a 1 – 4% volného grafitu. Materiál je vysoce odolný proti nalepení pásu, prokluzu a tvorbě tepelných trhlin. ZKH je tvořena lupínkovým grafitem, popuštěným martensitem, transformovaným ledeburitem a zbytkovým austenitem.

Standartní chemické složení:

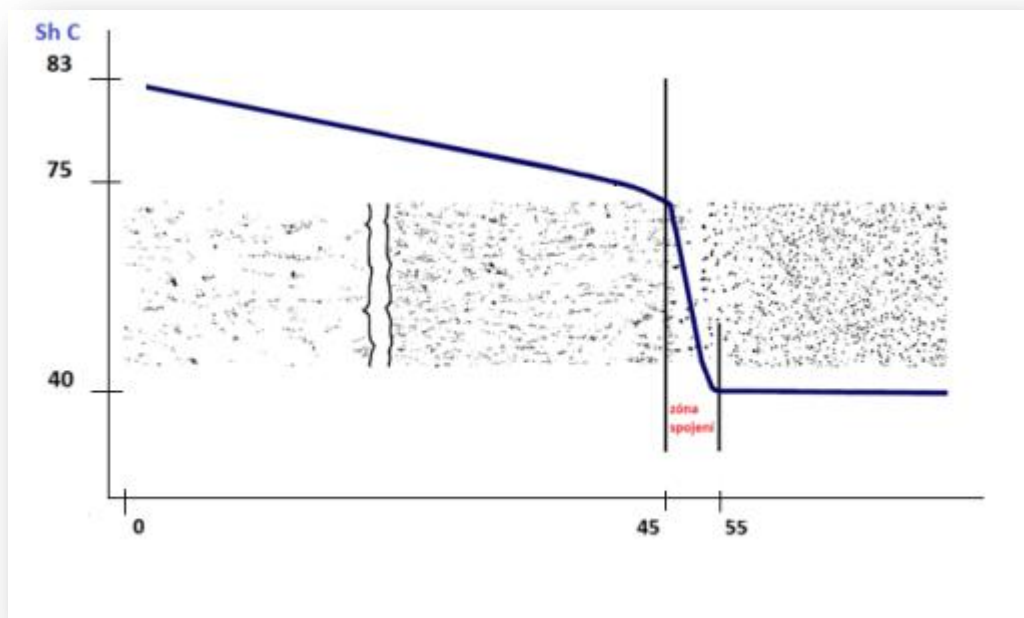


Mechanické hodnoty:



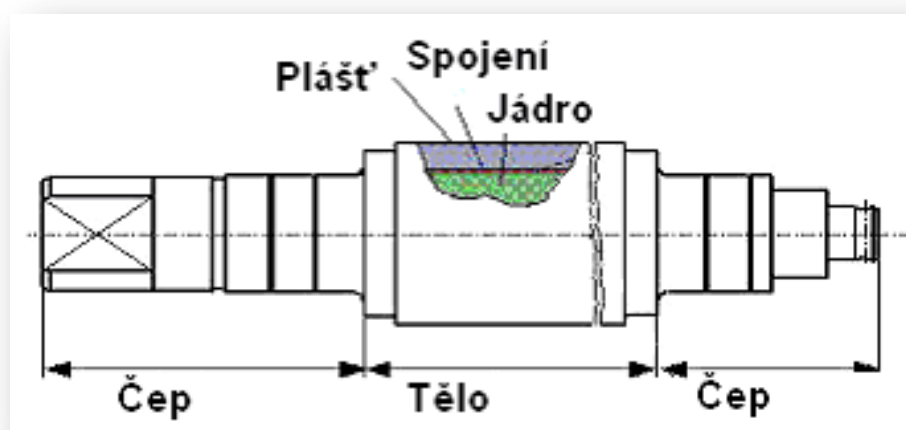
Pracovní plocha válců získává tvrdost podle chemického složení materiálu od 550 – 760 HV. Problémem u těchto válců je pokles tvrdosti směrem k jeho středu, kde se mění obsahy vyloučeného grafitu, v závislosti na vedení tavby, chemickém složení, rychlosti ochlazování. [7, 18] Na obr. 4.1, vidíme pokles tvrdosti válce směrem ke středu odlitku, současně s tvrdostí klesá i kvalita pracovního povrchu válce. Od konce 90. let je na snadě vyřešit tento problém, stabilizovat tvrdosti po celé pracovní vrstvě, zvýšit jakost materiálu a tím výkon válců. Za použití legur Ti, Nb, V a B došlo k ustálení tvorby volného grafitu a ovlivnění jeho tvaru.

Bór – slouží k rovnoměrnému rozložení grafitu do hloubky válce a získání většího počtu zárodků, které jsou tvořeny bornitridy s hexagonální mřížkou. Konečný obsah bóru se pohybuje 0,050 – 0,100 %.



Obrázek 4.1: Průběh tvrdostí pracovní vrstvy válců ICDP. [18]

Válce ICDP jsou lity odstředivým litím, vertikálně, jde o tzv. dvouvrstvé válce, kdy pracovní vrstvu tvoří plášťová vrstva, která je odlévána jako první. Druhá vrstva je jádrová tvoří čepy a vyplně válce (obr. 4.2).



Obrázek 4.2: Náskres válce. [18]

Výhody odstředivého lití:

Získáme vysokou homogenitu chem. složení pracovní vrstvy, a to ve všech směrech společně s větší rovnoměrnou tvrdostí po celé pracovní ploše těla válce.

Dále vysokou homogenitu chemického složení u obou čepů a tím i větší rovnoměrnost tvrdosti na obou čepech. Vysokou opakovatelnost kvality u ověřené výroby a možnost používání technologicky a metalurgicky náročných materiálů s vysokými obsahy karbidotvorných prvků (Cr, Mo, V, W, Co, Nb s tvrdostmi 1500 - 3000 HV 50). [18]

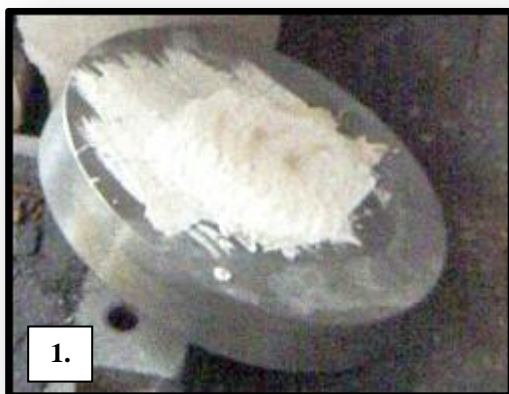
Pracovní postup: Podrobný popis taveb je vždy uveden u každé z taveb.

Na obrázcích a popisu vidíme postup výroby odlitků sloužících k výrobě vzorků.

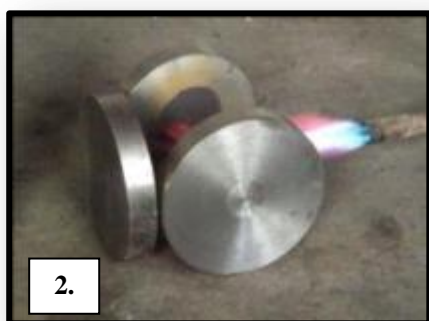


Tavící agregát: 100 kg elektrická indukční pec s neutrální korundovou vyzdívkou, slévárna VŠB-TUO.

Tavení – roztavení připravené suroviny.



1. Chladítka byla ošetřena nátěrem na bázi přetaveného křemene (Fised Silica), pro dobré oddělení formy od odlitku.



2. Chladítka byla nahřívána plamenem pro snížení odvodu tepla při lití = 200 °C.



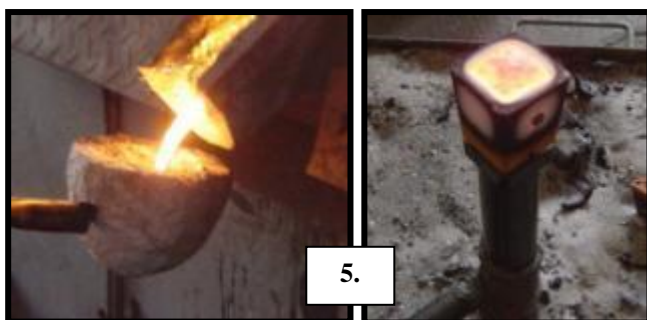
3.

3. Formy byly složeny a zatíženy.



4.

4. Pánev na taveninu a ponorná lžíce k odběru vzorků na termickou analýzu, pro zjištění teploty likvidu a obsahu uhlíku v litině, byla nahřívána pro snížení ztrát tepla.



5.

5. Odběr vzorku pro termickou analýzu a odlití taveniny do zkušebního kelímku QC 4010.



6.

6. Po odebrání vzorku na TA byly formy odlity a byl použit izolační zásyp.



7.

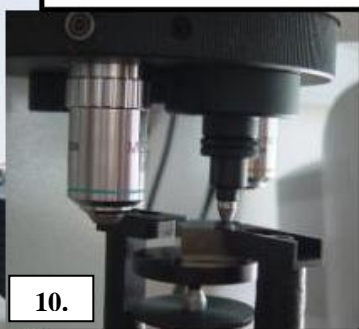


8.

7-8. Po vychladnutí byly odlitky vybity z formy a následně nařezány na vzorky pomocí vodního paprsku.



9.



10.

9. Metalografické zpracování vzorků probíhalo na stroji STUERS v laboratořích strukturní analýzy VŠB-TUO na katedře materiálového inženýrství.

10. U vzorků byla zjištěna průměrná mikrotvrdost pomocí mikrotvrdoměru model LM100, podle Vickerse při zatížení 300g [HV_{0,3}].

4.1 Vzorky z odlitých válců k porovnání výsledků

Výsledné hodnoty vidíme v tabulce č. 4. 1, standartní chemické složení válců je na str. 25. Hodnocení typu a velikosti grafitu proběhlo podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). Pořadí hodnocení je následující: **tvar, rozložení a velikost grafitu.**

Tabulka 4.1: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost dle Vickers, hodnocení grafitu a mikrostruktury.

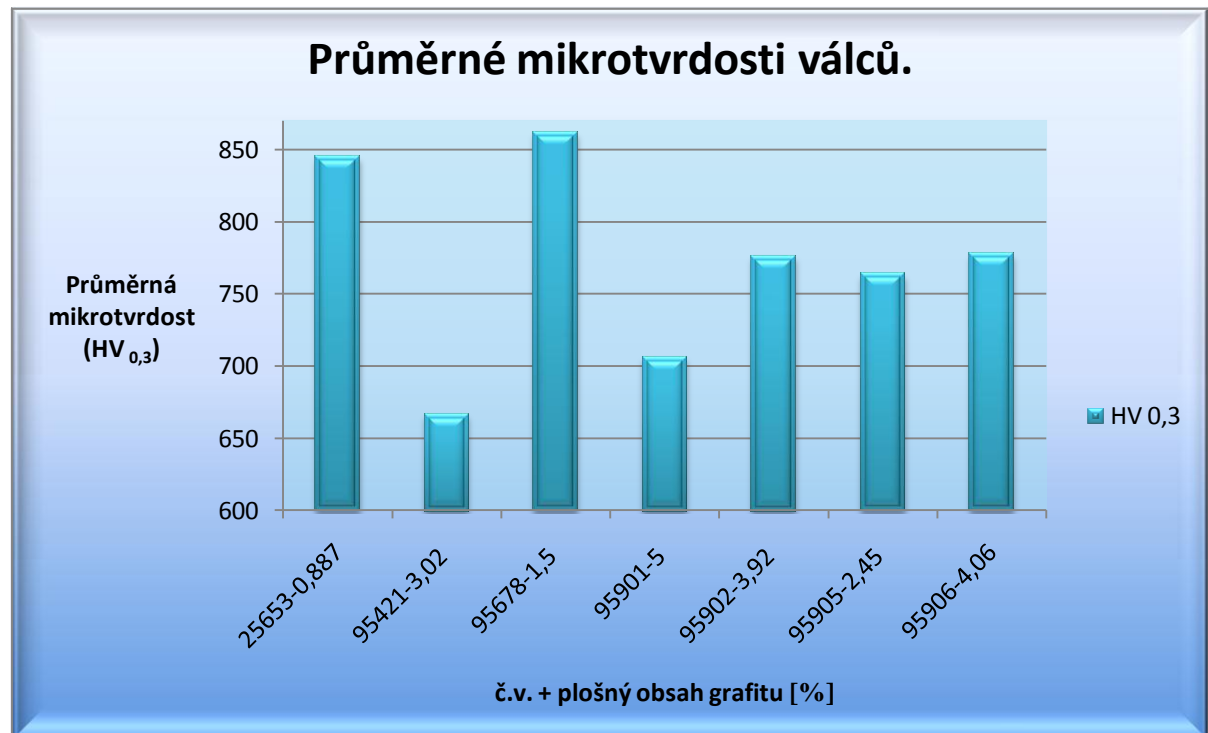
VZORKY VÁLCŮ	Vzorek č. 25653	Vzorek č. 95421	Vzorek č. 95678	Vzorek č. 95901	Vzorek č. 95902	Vzorek č. 95905	Vzorek č. 95906
	bez B	bez B	+B	+B 0,090	+B 0,090	+B 0,080	+B 0,080
Plošný obsah grafitu	0,887%	3,02%	1,5%	5%	3,92%	2,45%	4,06%
Průměrná mikrotvrdost HV _{0,3}	845	667	862	706	776	764	778
Hodnocení grafitu	VI; C;	II, III, V,	V, VI; C;	I, II, III;	I; A;	II, III, V;	II, V, VI;
	6	VI; C; 5	5	C; 4, 6	4	C; 5	C; 5
Mikrostruktura	TL, Cp 40	TL, Cp 40	KG, TL, M, Cp 40	TL, M, Cp 40	TL, M, Cp 40	KG, M, TL, Cp 40	TL, M, Cp 40

I, II, III, V, VI tvar grafitu. A, C rozložení grafitu. 4, 5, 6 velikost grafitu a Cp- cementit – hodnocen v % podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). TL- transformovaný ledeburit, M- martenzit, KG- kuličkový grafit.

➤ Dílčí závěr:

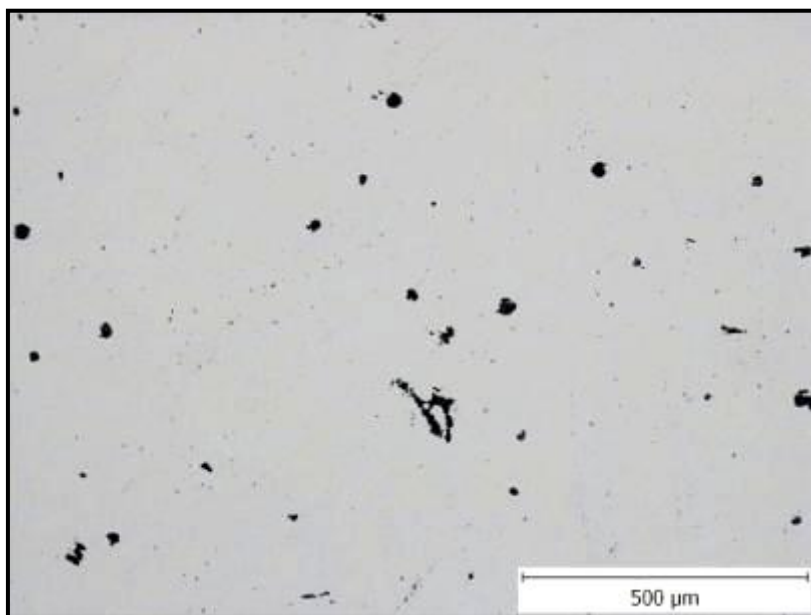
Hodnoty, které vidíme v tabulce č. 4.1, ukazují, že s bórem v tavenině se plošný obsah grafitu pohybuje od 1,5% do 5% a má menší velikost. Průměrné mikrotvrdosti jsou vyšší v případě menšího obsahu plošného grafitu. Vzorek č. 95678 s obsahem B, je odebrán z prasklého válce a vykazuje vysokou mikrotvrdost, což znamená, že s vyšším obsahem bóru stoupá křehkost materiálu. Přehledné uspořádání mikrotvrdostí válců vidíme v grafu č. 4.1.

Graf č. 4.1: Průměrné mikrotvrdosti válců.

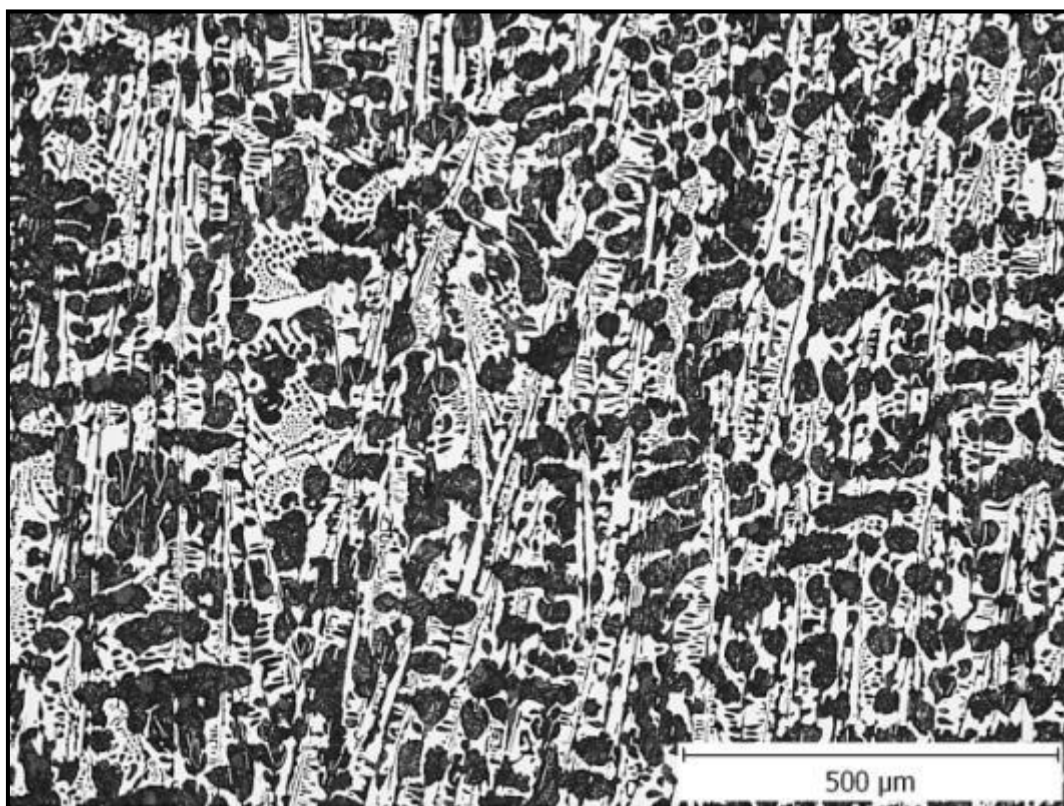


4.1.1 Výsledné struktury

Vzorek číslo: **25653**; podíl grafitu: **0,887%**; $HV_{0,3}$: **845**

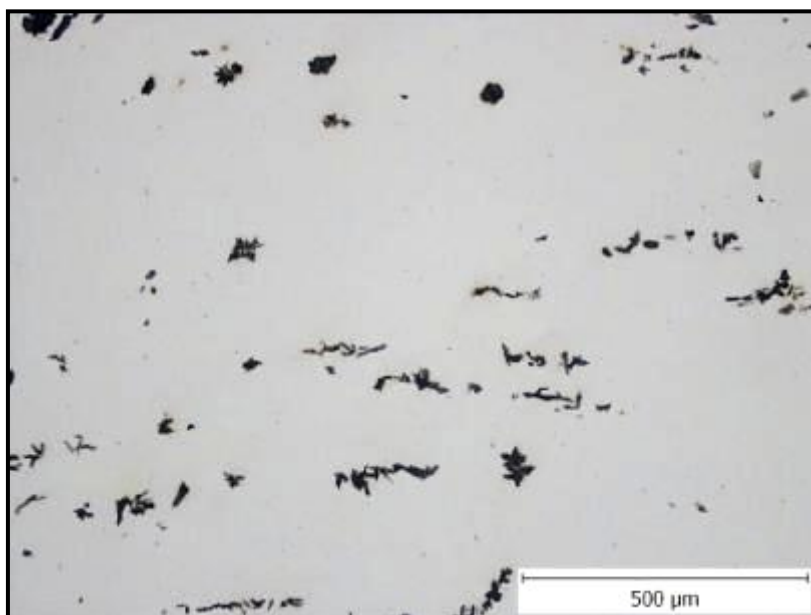


Typ grafitu-neleptáno: VI; C; 6.

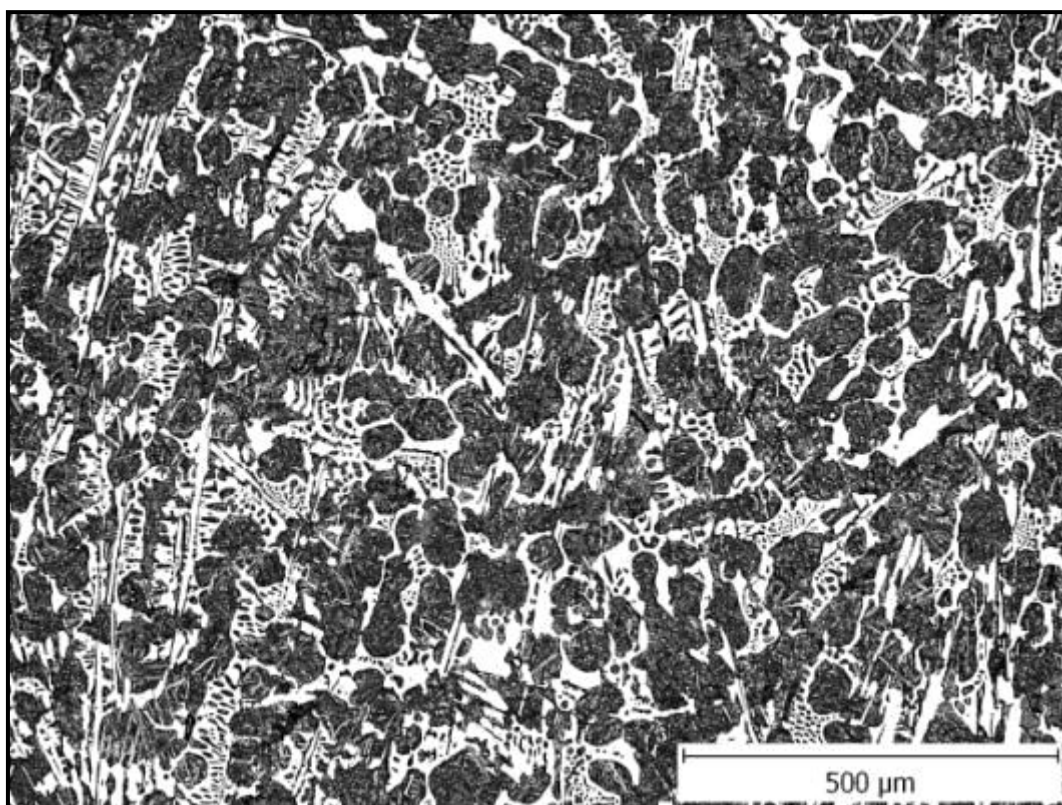


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **95421**; podíl grafitu: **3,02%**; $HV_{0,3}$: **667**

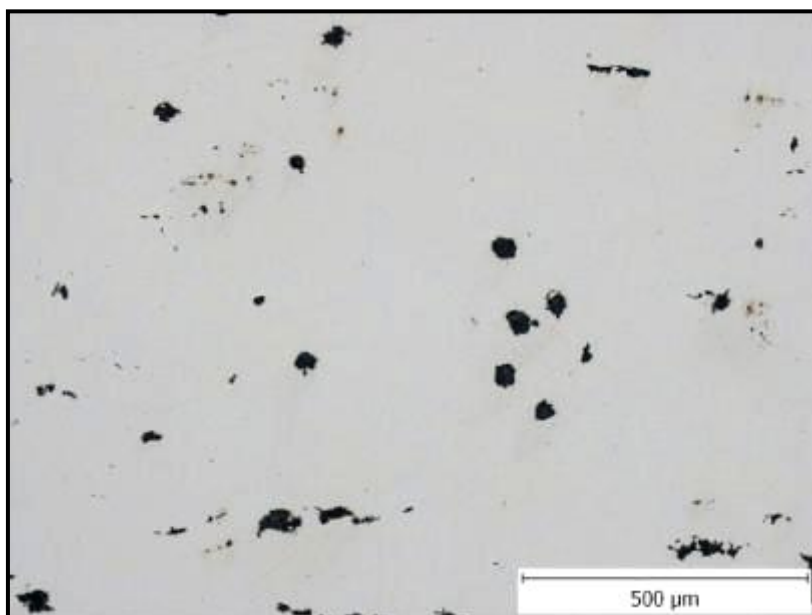


Typ grafitu-neleptáno: II, III, V, VI; C; 5.

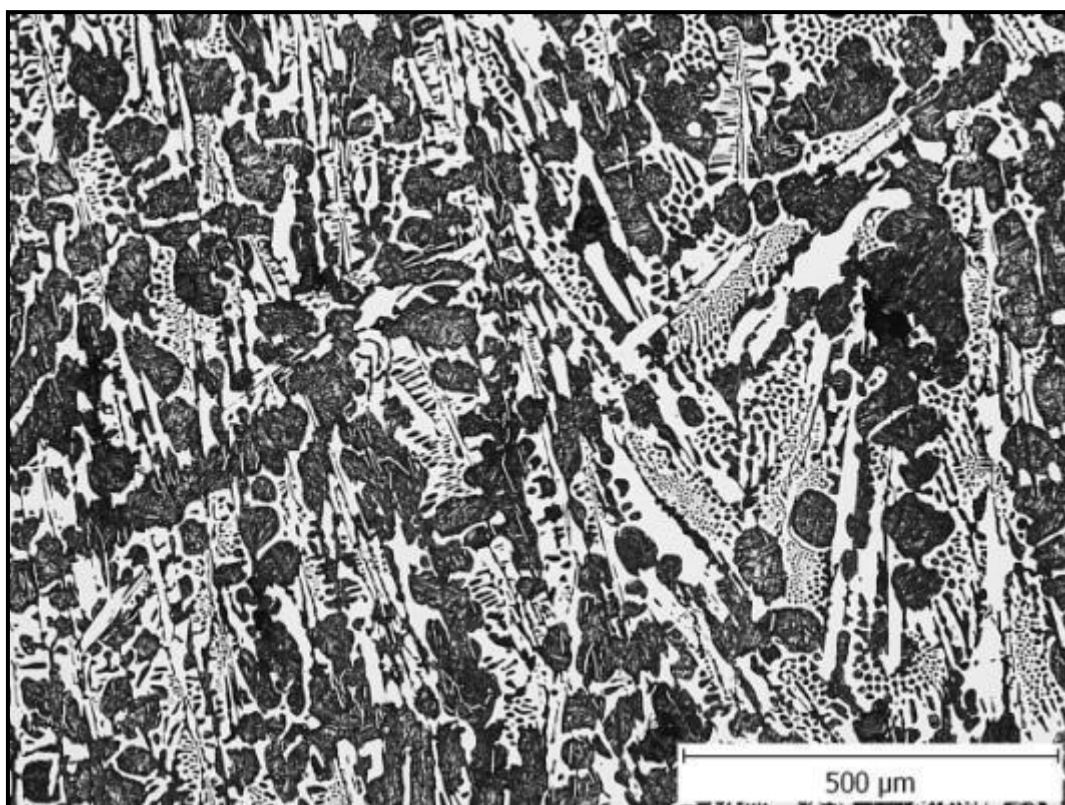


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **95678**; podíl grafitu: **1,5%**; $HV_{0,3}$: **862**

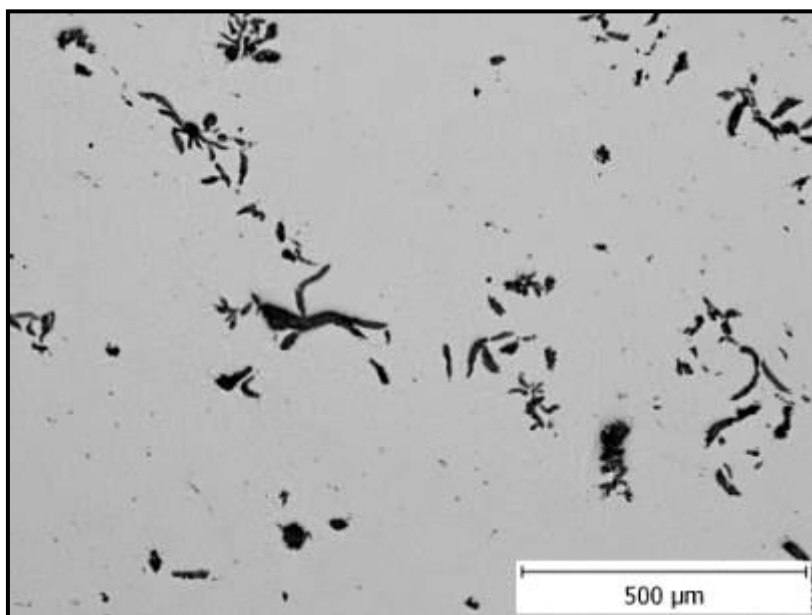


Typ grafitu-neleptáno: V, VI; C; 5.

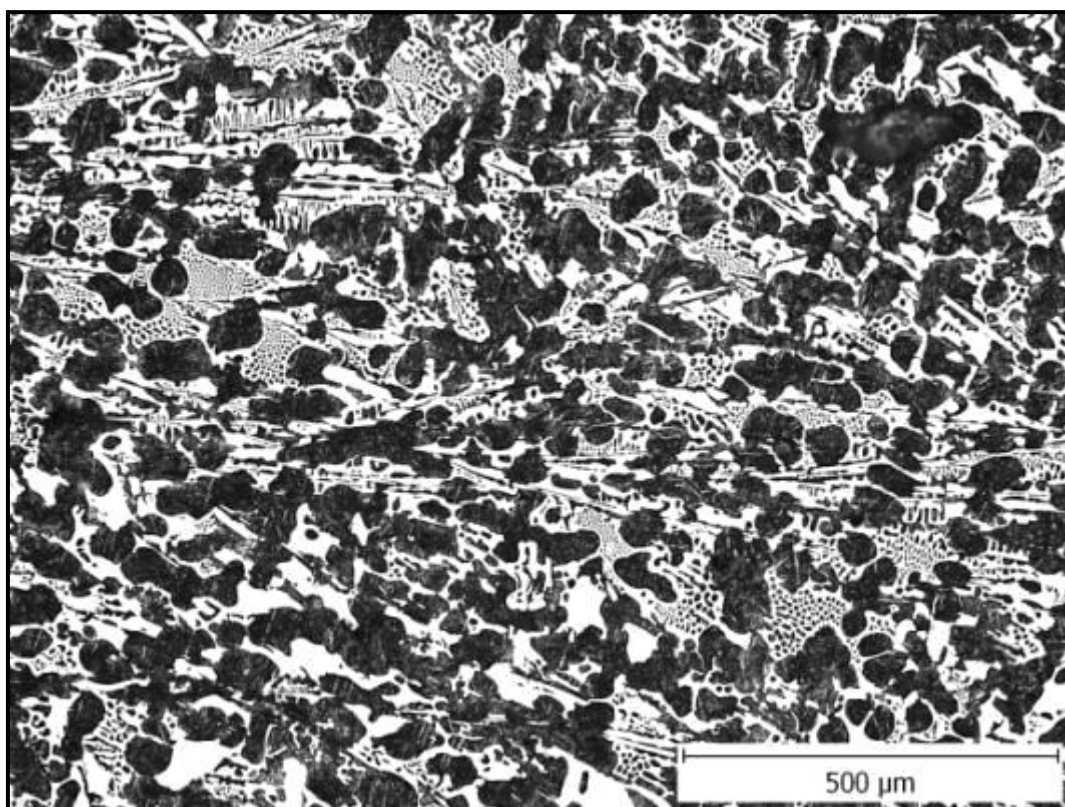


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: KG, TL M, Cp 40.

Vzorek číslo: **95901**; podíl grafitu: **5%**; $HV_{0,3}$: **706**

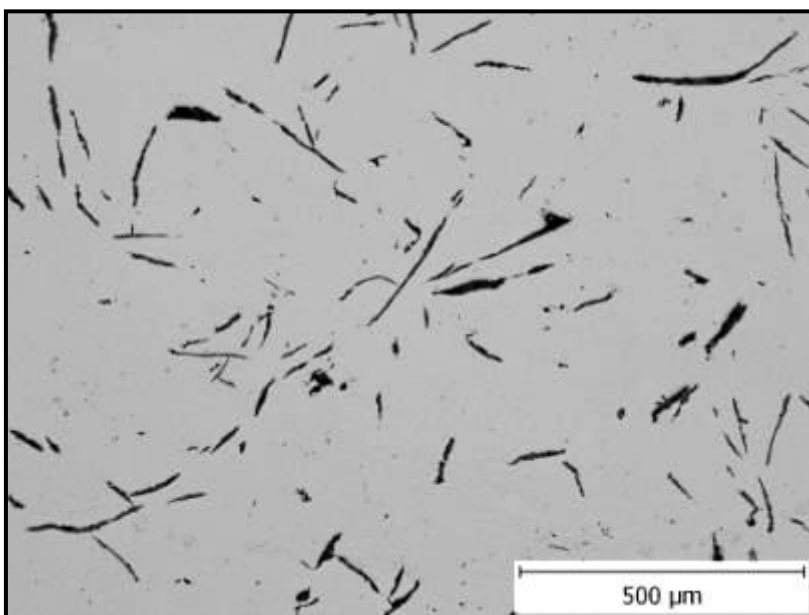


Typ grafitu-neleptáno: I, II, III; C; 4,6.

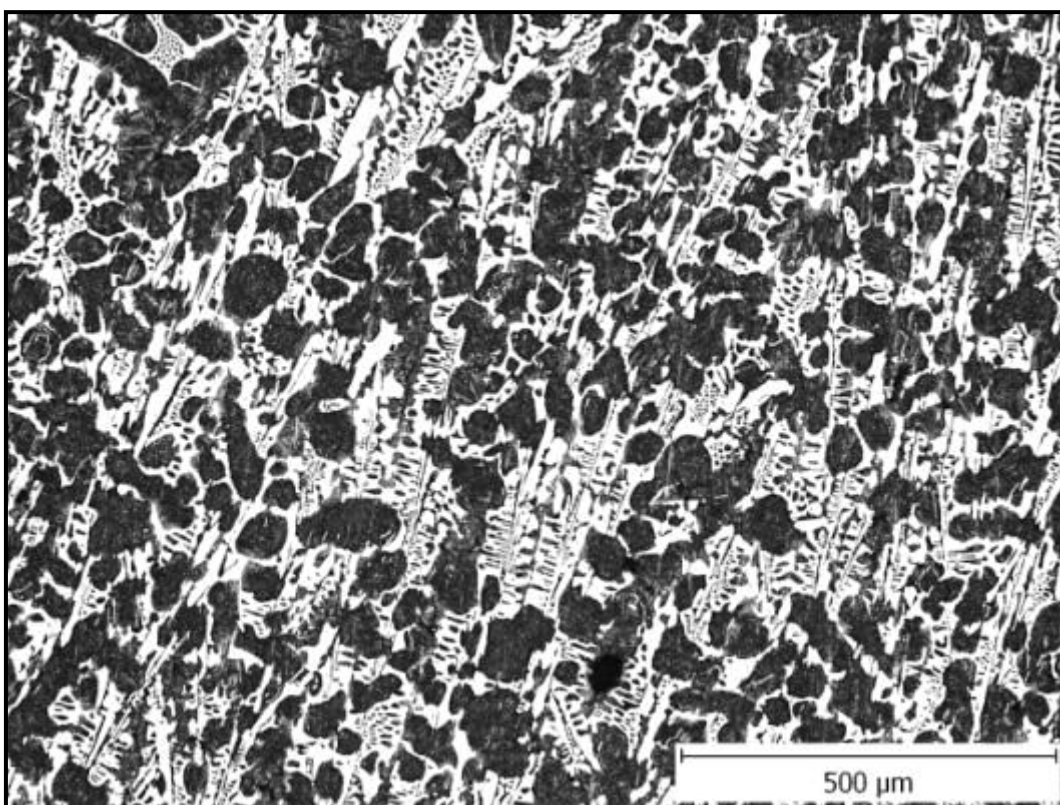


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: TL, M, Cp 40.

Vzorek číslo: **95902**; podíl grafitu: **3,92%**; $HV_{0,3}$: **776**

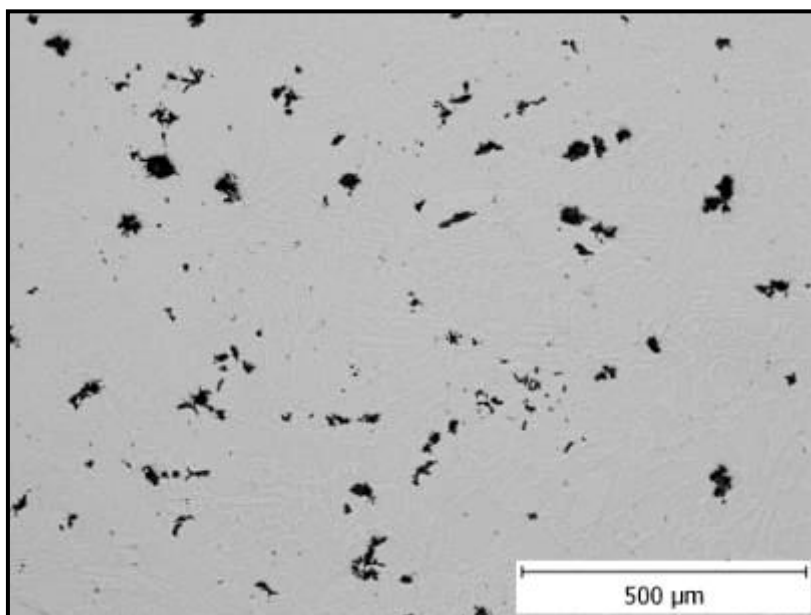


Typ grafitu-neleptáno: I; A; 4.

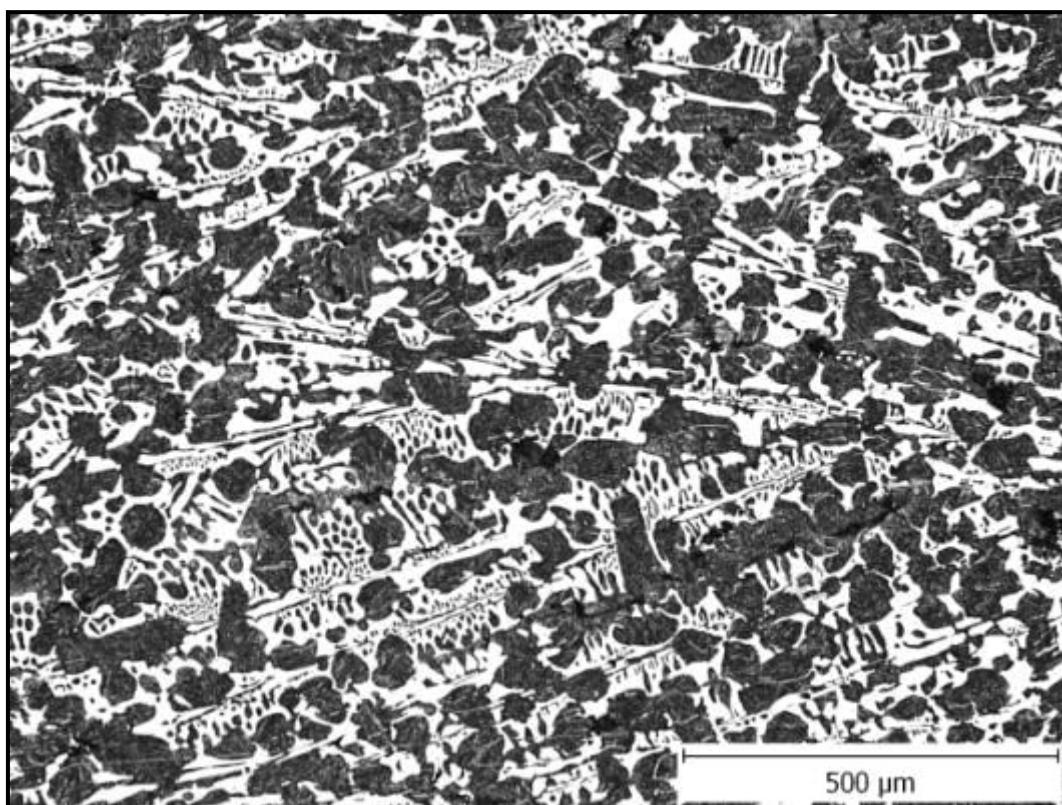


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: TL, M, Cp 40.

Vzorek číslo: **95905**; podíl grafitu: **2,45%**; $HV_{0,3}$: **764**

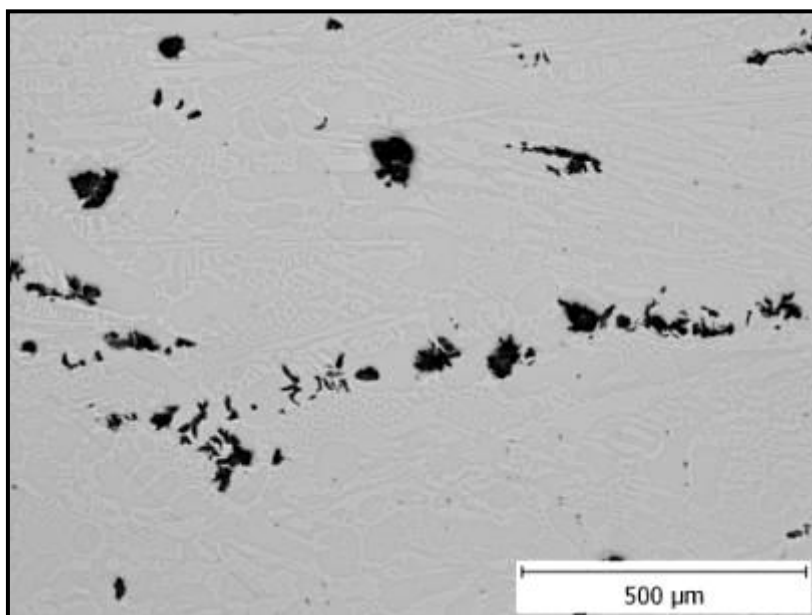


Typ grafitu-neleptáno: II, III, V; C; 5.

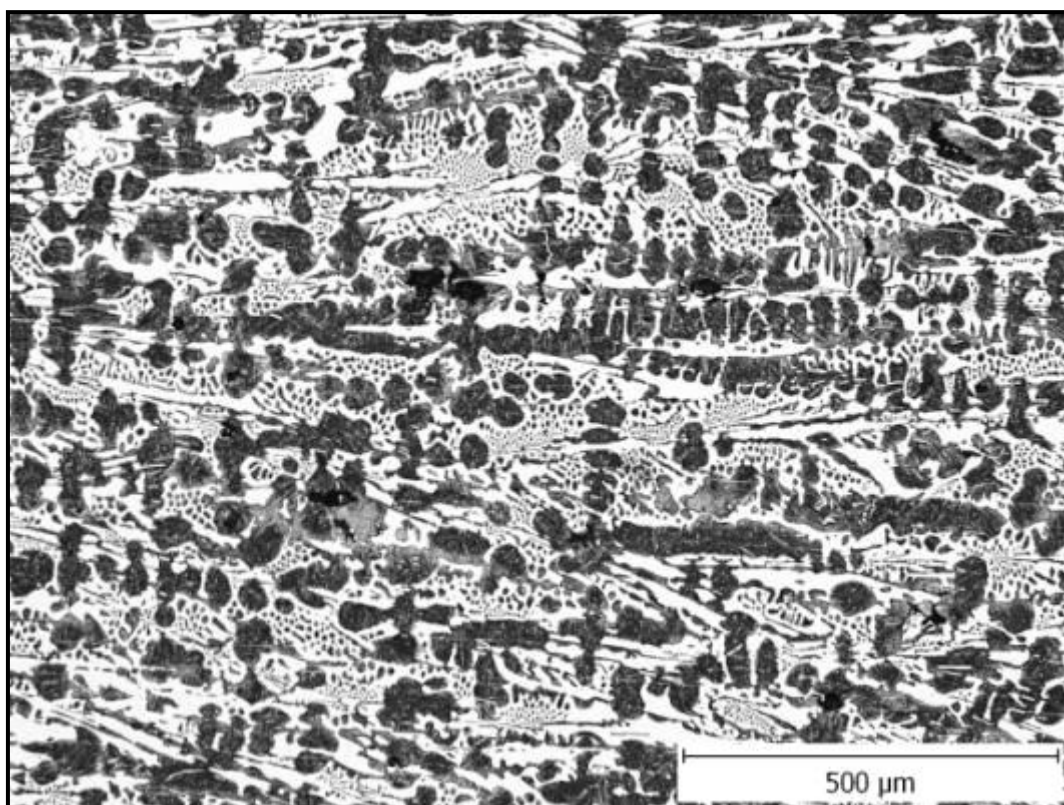


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: KG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **95906**; podíl grafitu: **4,06%**; $HV_{0,3}$: **778**



Typ grafitu-neleptáno: II, V, VI; C; 5.



Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: TL, M, Cp 40.

4.2 První tavba

Byla tavena indefinitní litina (ICDP), za použití vsázky chemického složení, viz tabulka 4.2. Celkem proběhly dvě tavby, které dostaly označení A a B. Každá tavba měla dvě varianty a to podle úkonu, který byl prováděn, vysvětlené pojmy u každé z variant postupně při popisu taveb.

- A/I ↓ C – nauhličení před odpichem a A/II ↓ C – nauhličení před odpichem, + B.
- B/I C – konečný a B/II C – konečný, +B.

Tabulka 4.2: Směrné chemické složení vsázky.

Válec	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	B [%]	T _l [°C]
Z	2,67	0,92	0,84	0,040	0,014	1,78	4,40	0,40	0,10	0,020	1 309
B	2,80	0,90	0,83	0,039	0,016	1,82	4,39	0,38	0,10		1 293
P	2,90	0,91	0,85	0,034	0,016	1,70	4,35	0,42	0,10	0,011	

A: tavení při nízkém obsahu uhlíku, nauhličení litiny před odpichem.

Varianta I: Bez ovlivnění tvaru grafitu = A/I ↓ C – nauhličení před odpichem

1. Tavení – roztavení připravené suroviny.
2. Po natavení 1340 °C – kontrolní odběr TA, prodleva na této teplotě cca 30 min.
3. Nauhličení – využití TA – teplota likvidu 1220 °C teplota přehřátí max. 1410 °C.
4. TA – případná úprava hodnoty alfa očkovaním.
5. Očkování v peci: 0,08%Si z LC Graphidox, 0,05%Si z FeSidrc
6. Kontrolní TA před odpichem.
7. Odpichová teplota 1380 °C.
8. Očkování v pánvi: CaMnSi 1,0kg/t, FeMnaff. 0,8kg/t.
9. Lící teplota T_l+100°C.
10. Odlití – penízek pro spektro, technolog. zkouška, TA.

Varianta II: Očkování grafitu Bórem = A/II ↓C – nauhličení před odpichem, + B

1. Tavení – roztavení připravené suroviny.
2. Po natavení 1340 °C – kontrolní odběr TA, prodleva na této teplotě cca 30 min.
3. Nauhličení – využití TA – teplota likvidu 1220 °C teplota přehřátí max. 1410 °C.
4. TA – případná úprava hodnoty alfa očkováním.
5. Vnesení FeB do pece (využití cca 80% při dávkování do pece), kontrola pomocí TA, očkování v peci: 0,08%Si z LC Graphidox, 0,05%Si z FeSidrc.
6. Kontrolní TA před odpichem.
7. Odpichová teplota 1380 °C.
8. Očkování v pánvi: CaMnSi 1,0kg/t, FeMnaff. 0,8kg/t.
9. Lící teplota Tl+100°C.
10. Odlití – peníze pro spektro, technolog. zkouška, TA.

B: tavení s konečným obsahem uhlíku.

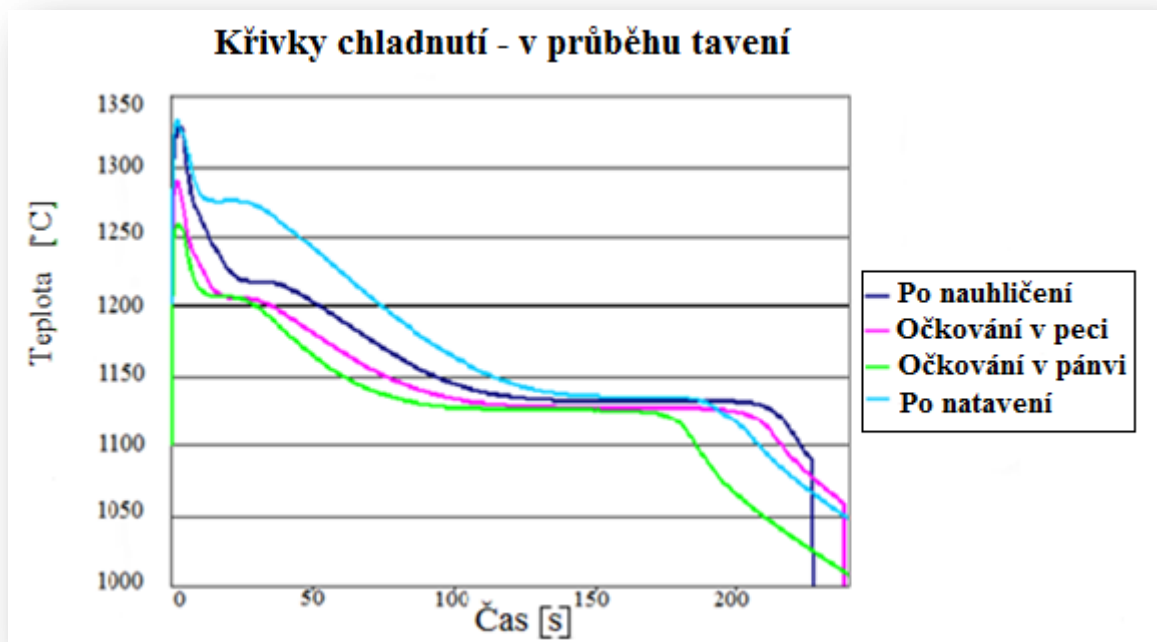
Varianta I: Bez ovlivnění tvaru grafitu = B/I C – konečný

1. Tavení – roztavení připravené suroviny s dodáním nauhličovadla do pevné vsázky.
2. Po natavení na 1340 °C – kontrolní odběr TA.
3. Úprava teploty likvidu na hodnotu 1220 °C, teplota přehřátí max. 1410 °C.
4. TA – případná úprava hodnoty alfa očkováním.
5. Očkování v peci: 0,08%Si z LC Graphidox, 0,05%Si z FeSidrc.
6. Kontrolní TA před odpichem.
7. Odpichová teplota 1380 °C.
8. Očkování v pánvi: CaMnSi 1,0kg/t, FeMnaff. 0,8kg/t.
9. Lící teplota Tl+100°C.
10. Odlití – peníze pro spektro, technolog. zkouška, TA.

Varianta II: Očkování grafitu Bórem = **B/II C – konečný, +B**

1. Tavení – roztavení připravené suroviny s dodáním nahlička k pevné vsázce.
2. Po natavení 1340 °C – kontrolní odběr TA.
3. Úprava teploty likvidu na hodnotu 1220 °C, teplota přehřátí max. 1410 °C.
4. TA – případná úprava hodnoty alfa očkováním.
5. Vnesení **FeB do pece,** (využití cca 80% při dávkování do pece), kontrola pomocí TA, očkování v peci: **0,08%Si z LC Graphidox, 0,05%Si z FeSidrc.**
6. Kontrolní TA před odpichem.
7. Odpichová teplota 1380 °C.
8. Očkování v pánvi: **CaMnSi 1,0kg/t, FeMnaff. 0,8kg/t.**
9. Lící teplota Tl+100°C.
10. Odlití – penízek pro spektro, technolog. zkouška, TA.

Cílem taveb A a B ve variantách I. a II. je získání vzorků pro metalografické hodnocení. Na obrázku 4.3 vidíme křivky chladnutí taveniny.



Obrázek 4.3: Křivky tuhnutí během tavení

4.2.1 Výroba vzorků z tavby 1

Do jednotné bentonitové směsi, bylo zaformováno a odlito 7 geometrických tvarů, které se lišily výškou a hloubkou (viz PŘÍLOHA 3). Rozměry vidíme v tabulce č. 4.3. Cílem je porovnat vliv rychlosti tuhnutí (krystalizace) na grafitizaci, průměrnou mikrotvrdost a mikrostrukturu litiny. Následně byly z těchto odlitků vodním paprskem nařezány vzorky, pro další zpracování.

Tabulka 4.3: Rozměry odlitků z první tavby.

ODLITEK	ROZMĚRY [mm]
č. 1	100x100x80
č. 2	100x100x50
č. 3	100x90x45
č. 5	100x100x30
č. 6	100x45x40
č. 7	100x45x20
č. 8	100x100x10

4.2.2 Metalografické zpracování vzorků z tavby 1

Příprava vzorku pro metalografickou analýzu probíhala na strojích firmy STRUERS. Broušení vzorků bylo rozděleno na 3 fáze za použití stroje typu ABRAMIN:

- **hrubé broušení:** 2×15min broušení za použití vody na brusném kotouči firmy STRUERS typ PIANO 80, následně se vzorky očistily vodou, polily lihem, a vysušily fénem
- **jemné broušení:** cca 4min, na 9μm pomocí diamantové suspenze DiaDuo (diamid suspension and lubrikant in ones) pro 9μm na brusném kotouči ALLEGRO, následně se vzorky očistily vodou, polily lihem, a vysušily fénem
- **leštění:** cca 8min, na 3μm pomocí DiaDuo pro 3μm na leštícím suknu DAC, dále se vzorky očistily vodou, polily lihem, a vysušily fénem

Následně optickým mikroskopem typu OLYMPUS GX51 za použití programu „Quick photo mikro 2.3“ byly vyrobeny fotky se strukturou grafitu, a mikrostruktury při zvětšení 100x, z nich jsem následně vyhodnotila podíly grafitu. Výsledné struktury najdeme vždy na konci každé z popisovaných taveb.

4.2.3 Výsledné hodnoty vzorků z tavby 1

Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdość, hodnocení grafitu a mikrostruktur vidíme v tabulce č. 4.4. Hodnocení typu a velikosti grafitu proběhlo podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). Pořadí hodnocení je následující: **tvar, rozložení a velikost grafitu**.

Tabulka 4.4: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdość, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.

Tavba 1	č. 1 80[mm]	č. 2 50[mm]	č. 3 45[mm]	č. 5 30[mm]	č. 6 40[mm]	č. 7 20[mm]	č. 8 10[mm]
Plošný obsah grafitu	3,8%	6,7%	5,6%	5,4%	5,09%	5,3%	5,1%
Průměrná mikrotvrdość HV_{0,3}	696	808	708	701	710	668	692
Hodnocení grafitu	I; C;	I; C;	I, II; C;	I; C;	I; C;	I, II; C;	I; C;
	4	4	4	5	5	5	6
Mikrostruktura	LG, M, TL, Cp 4	LG, M, TL, Cp 10	LG, M, TL, Cp 4	LG, M, TL, Cp 4	LG, M, TL, Cp 4	LG, M, TL, Cp 10	LG, M, TL, Cp 10

I, II tvar grafitu. C rozložení grafitu. 4, 5, 6 velikost grafitu a Cp- cementit- hodnocen v % podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). TL- transformovaný ledeburit, LG- lupínkový grafit, M- martenzit.

Tabulka 4.5: Chemické složení vzorků: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8.

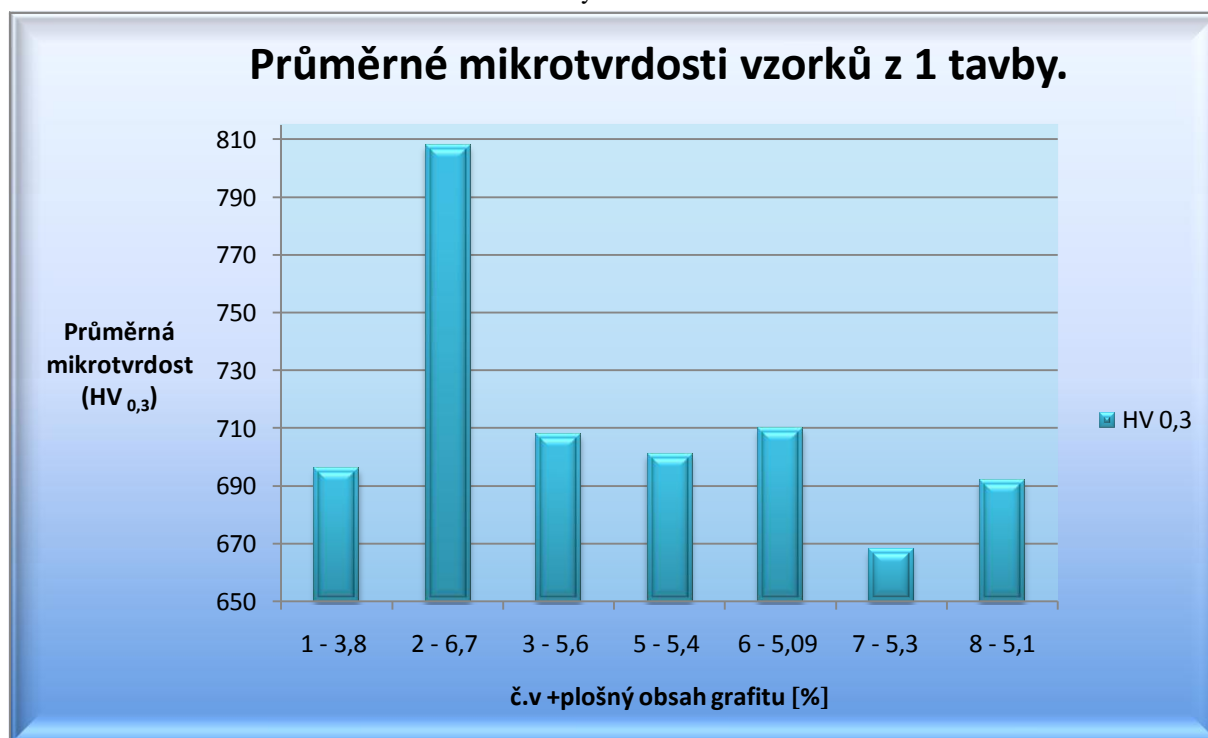
Tavba 1	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	B [%]	Ti [%]
1, 2, 3, 5, 6, 7, 8	3,4±	0,89	0,88	0,034	0,016	4,39	1,75	0,38	0,1	0,013	0,025

➤ Dílčí závěr:

Byly porovnávány vzorky 1, 2, 5, a 8, které jsou odebrány z odlitků stejných rozměrů lišících se pouze výškou. Z tabulky 4.4 je patrné, že se při změně výšky u vzorku č. 1 a 2 výrazně zvýšila průměrná mikrotvrdość materiálu a plošný podíl grafitu. V dalším srovnání vidíme, že vzorek č. 5 a 8 při menší výšce má také větší obsah plošného grafitu, ale tvrdost

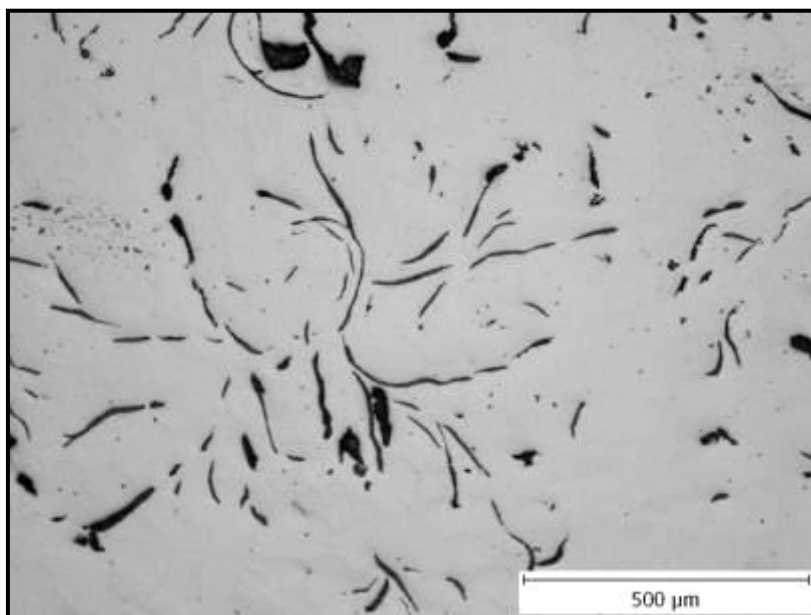
při 10 mm je nejmenší. To by znamenalo, že při malých výškách materiálu může narůstat jeho křehkost. Další porovnávané vzorky č. 3, 6 a 7 se taktéž liší výškou a v případě vzorku 3 také hloubkou, odlitky 6 a 7 mají poloviční hloubku vzorku 3, tzn. 45 [mm]. Č. 6 má vyšší mikrotvrdost a menší tvar grafitu, č. 7 má mikrotvrdost výrazně nižší, zato se u něj objevuje změna tvaru grafitu I, na I a II a plošný obsah grafitu je také menší. Dále z křivek na obr. 4.3 na str. 42, je patrné, že očkování bylo účinné, změnily se charakteristiky tuhnutí litiny tak, že při konečném zaočkování v pánvi došlo ke snížení teploty likvidu z 1340 °C na 1251 °C, čímž se snížil interval tuhnutí litiny. Chemické složení vzorků z 1 tavby najdeme v tabulce č. 4.5. Průměrná mikrotvrdost vzorků je znázorněna v grafu č. 4.2.

Graf č. 4.2: Průměrné mikrotvrdosti vzorků z 1 tavby.

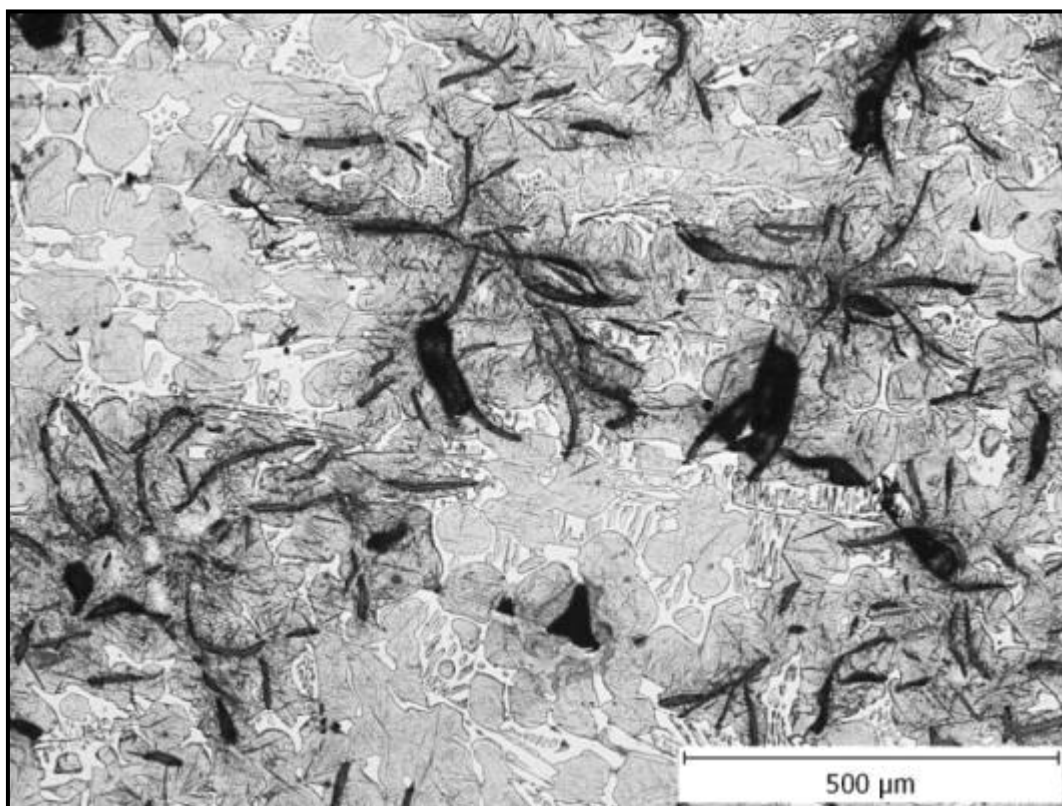


4.2.4 Výsledné struktury

Vzorek číslo: 1 [100x100x80 mm]; podíl grafitu: 3,8%; $HV_{0,3}$: 696

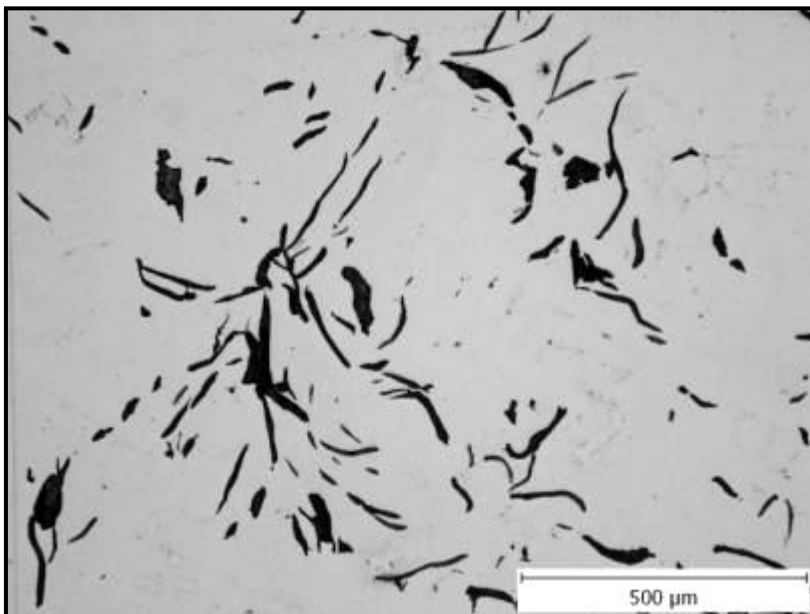


Typ grafitu-neleptáno:I-středně zvlněný; C; 4.

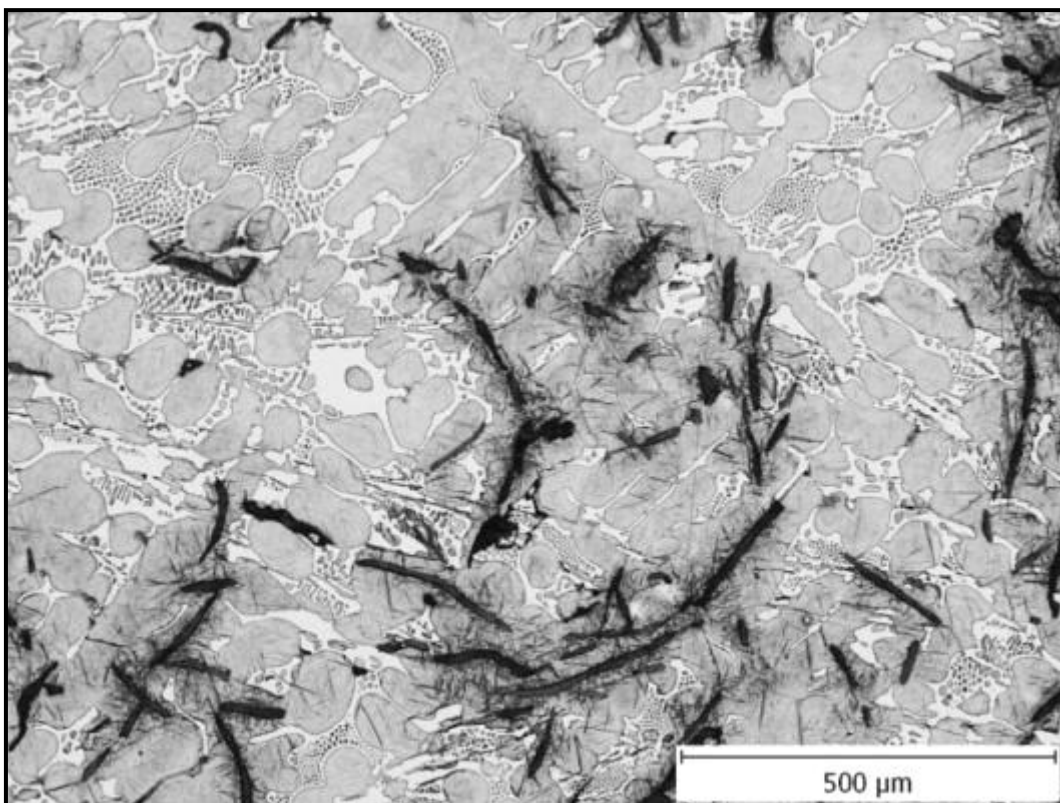


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 4.

Vzorek číslo: 2 [100x100x50]; podíl grafitu: 6,7%; $HV_{0,3}$: 808

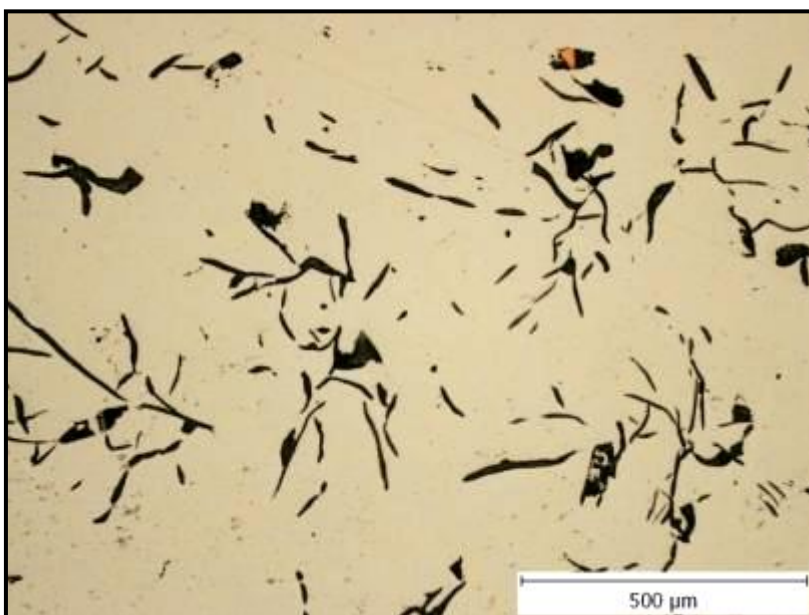


Typ grafitu-neleptáno: I; C; 4.

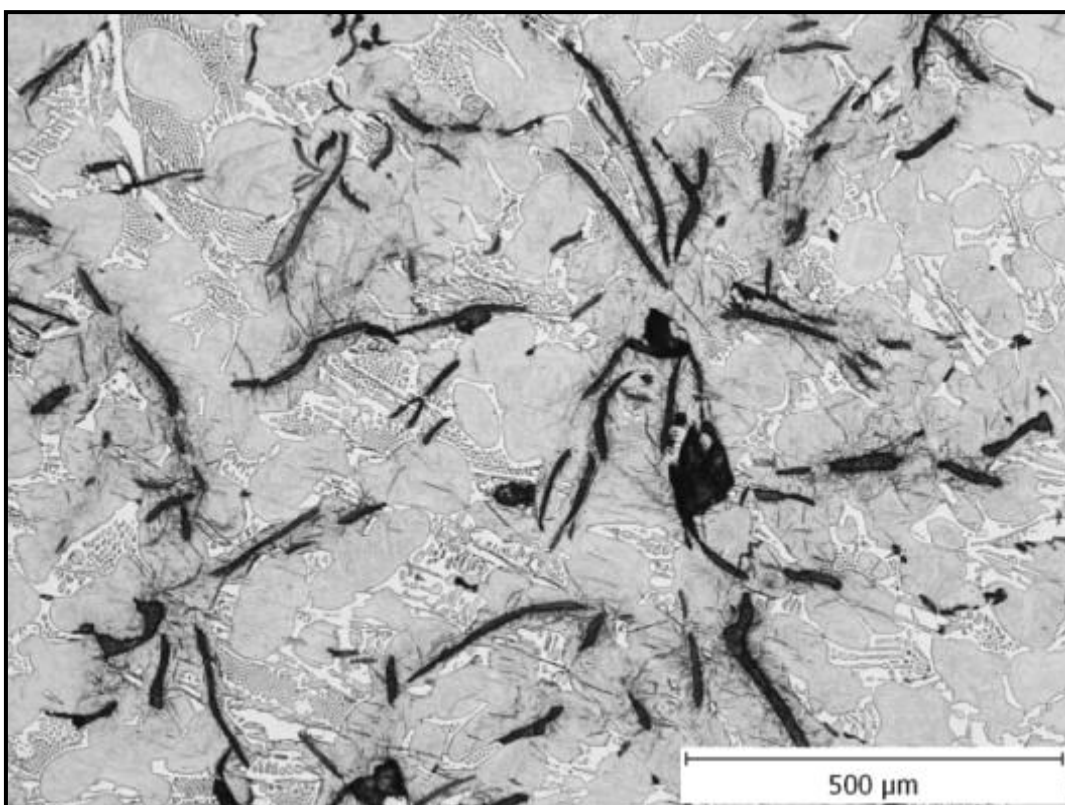


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 10.

Vzorek číslo: 3 [100x90x45]; podíl grafitu: 5,6%; $HV_{0,3}$: 708

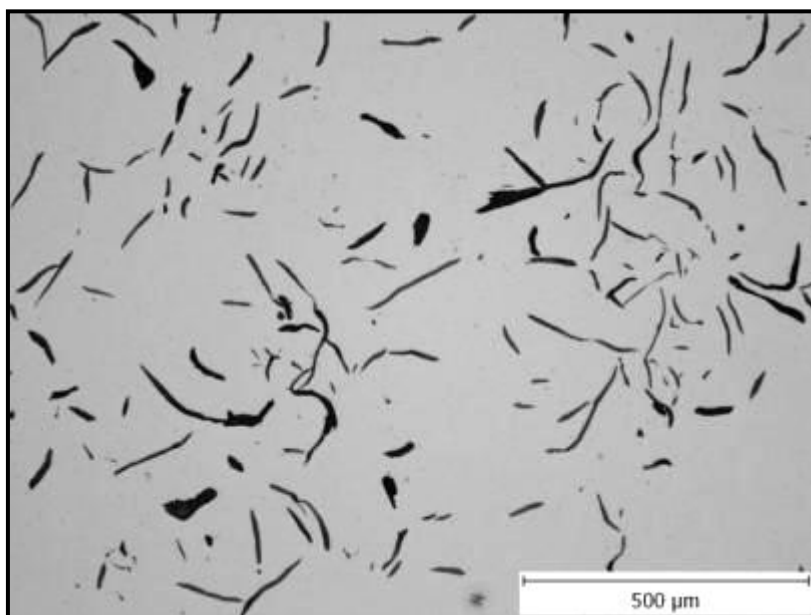


Tvar grafitu-neleptáno: I,II; C; 4.

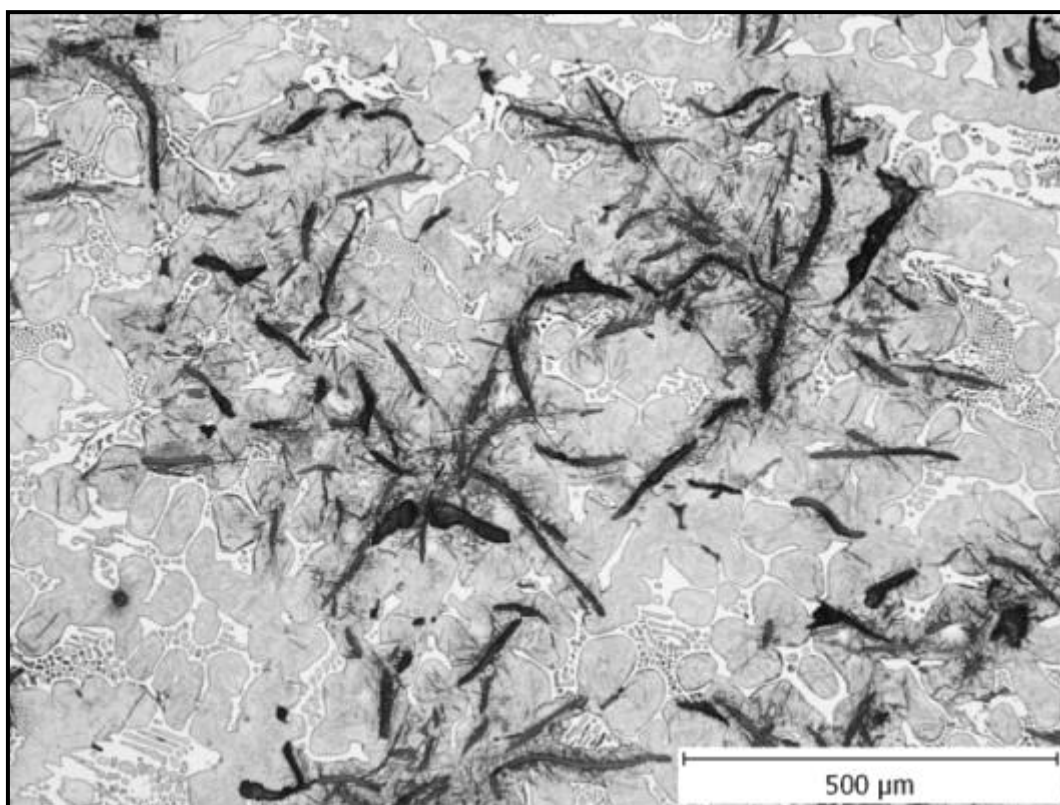


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 4.

Vzorek číslo: **5** [100x100x30]; podíl grafitu: **5,4%**; $HV_{0,3}$: **701**

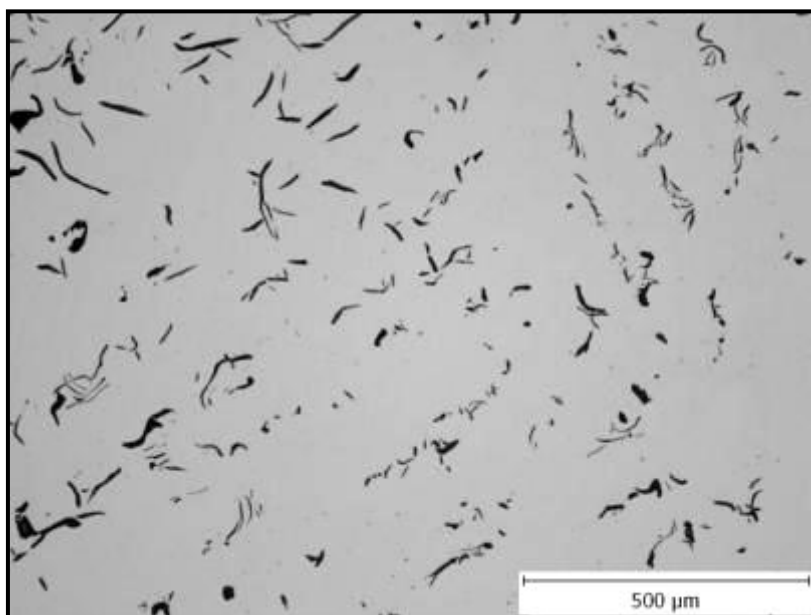


Typ grafitu-neleptáno: I; C; 5.

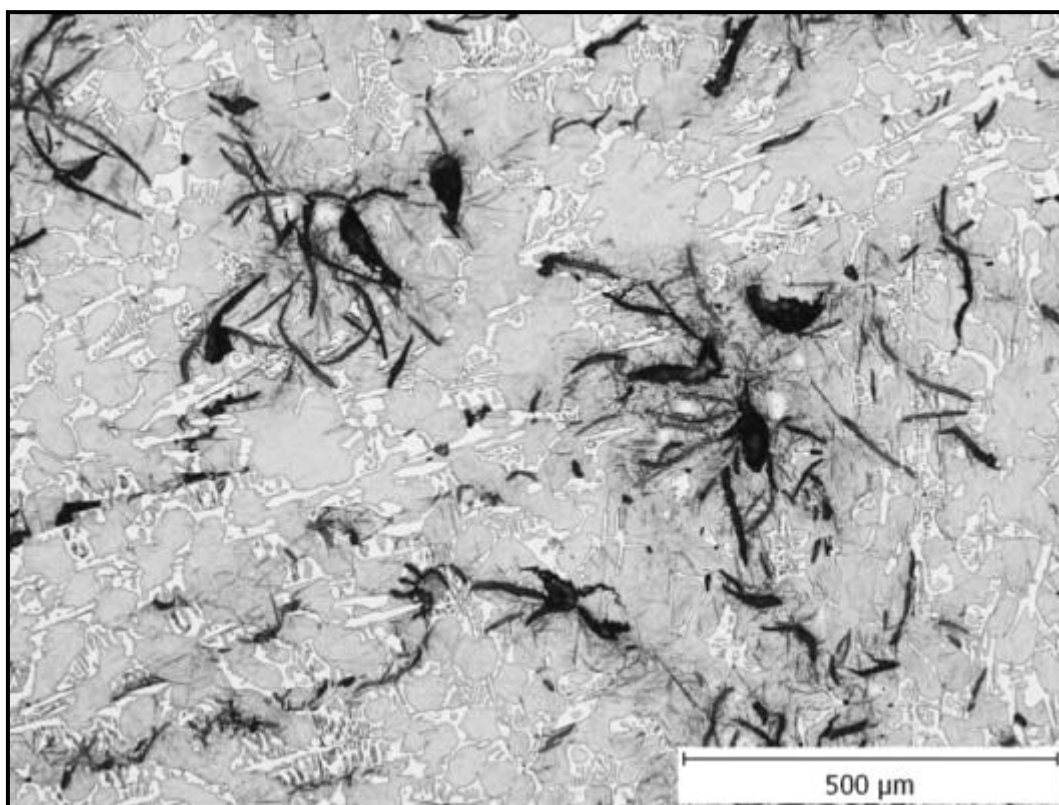


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 4.

Vzorek číslo: 6 [100x45x40]; podíl grafitu: 5,09%; $HV_{0,3}$: 710

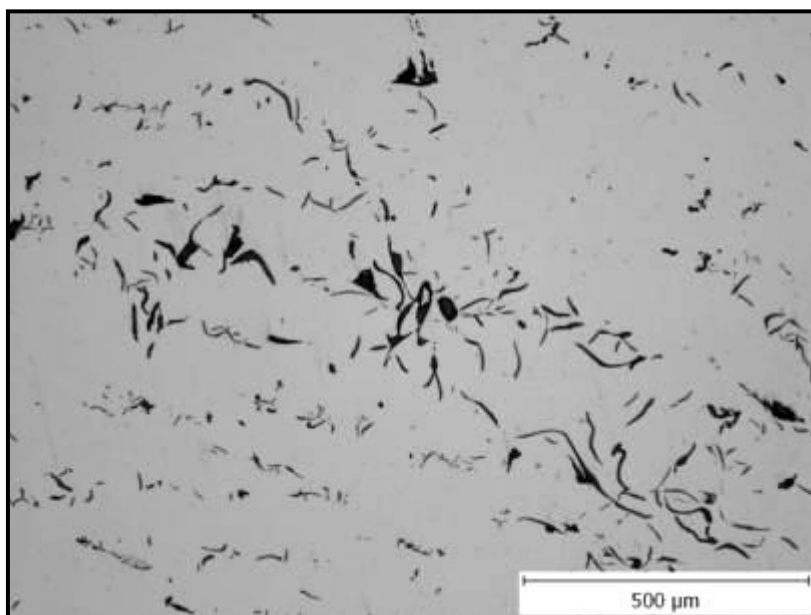


Typ grafitu-neleptáno: I; C; 5.

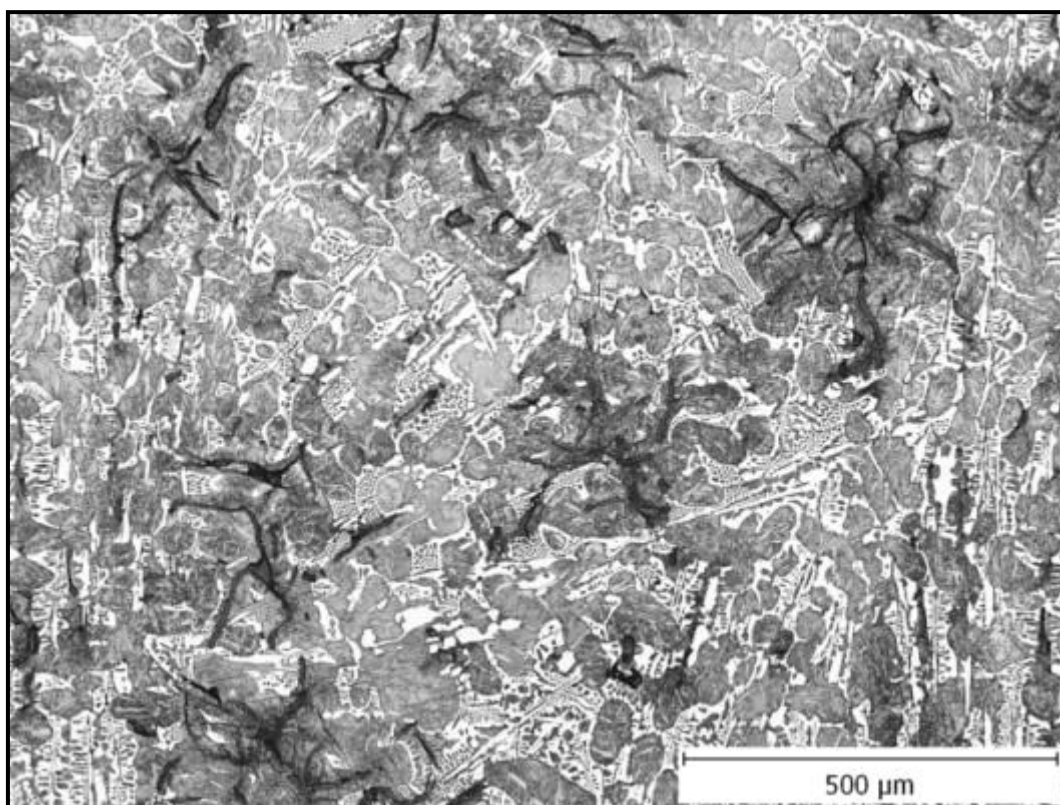


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 4.

Vzorek číslo: **7** [100x45x20]; podíl grafitu: **5,3%**; $HV_{0,3}$: **668**

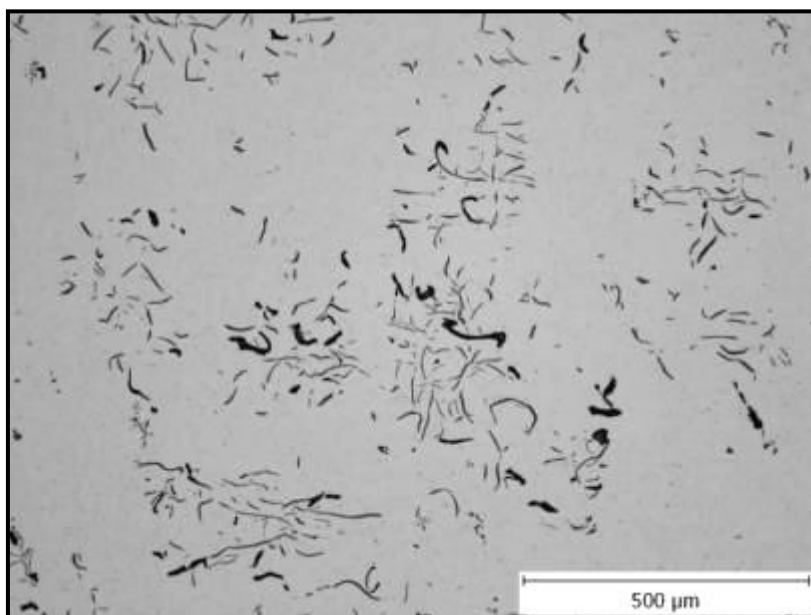


Typ grafitu-neleptáno: I, II; C; 5.

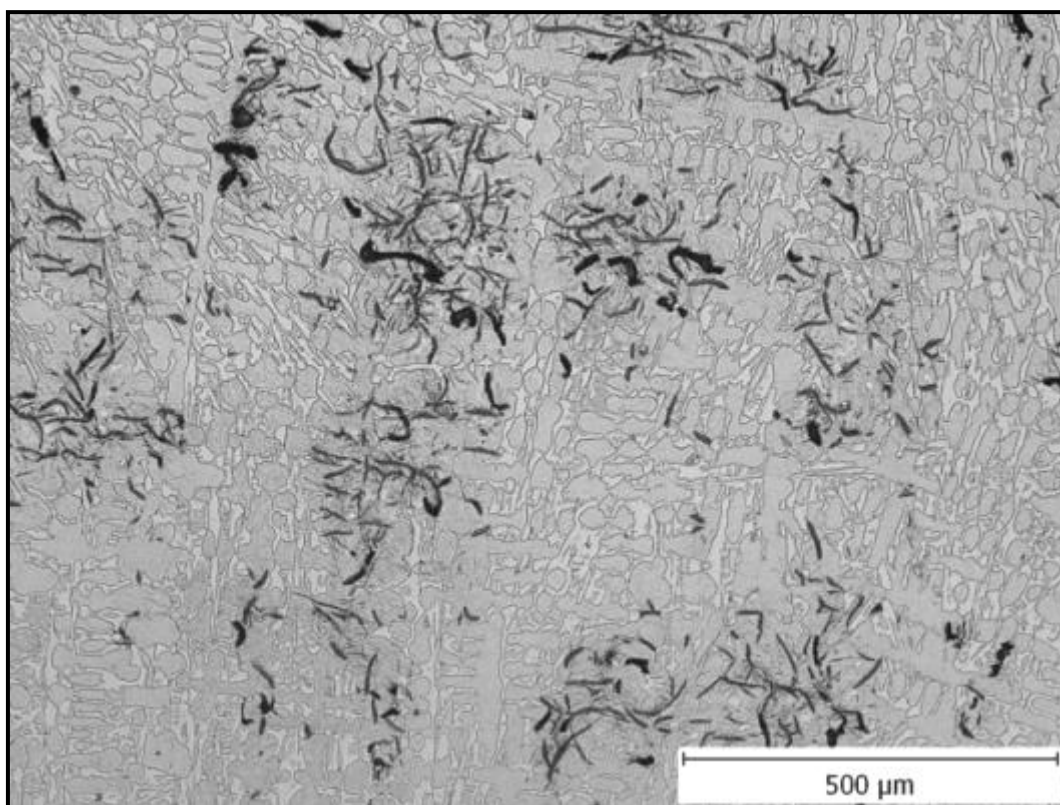


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 10.

Vzorek číslo: **8** [100x100x10]; podíl grafitu: **5,1%**; $HV_{0,3}$: **692**



Typ grafitu-neleptáno: I-zvlněný; C; 6.



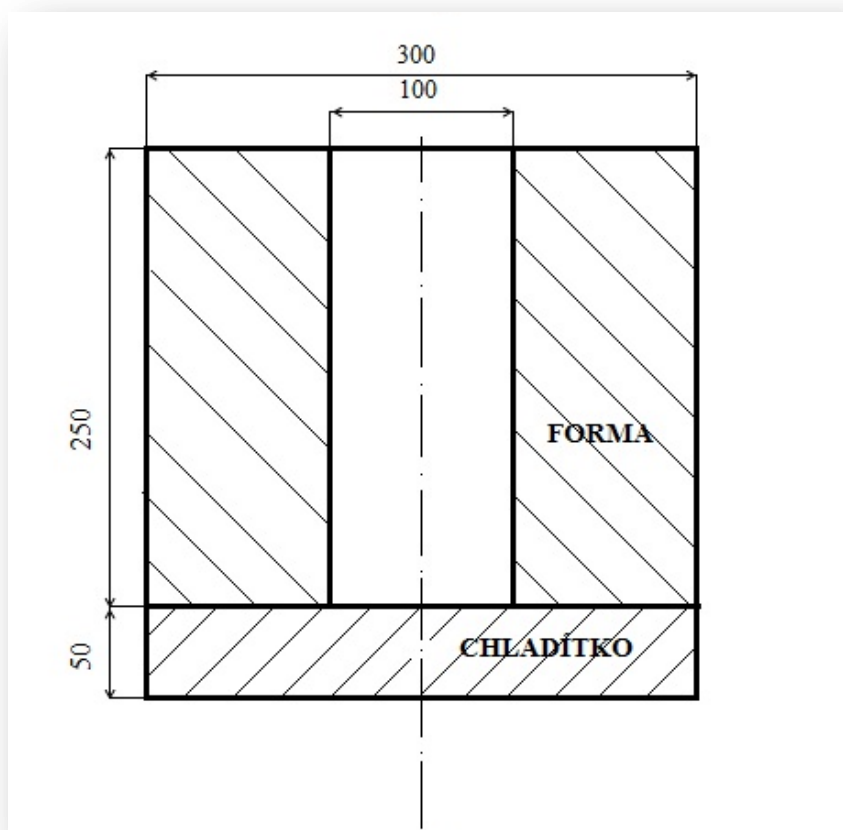
Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 10.

4.3 Druhá tavba

Druhá tavba má stejné směrné chemické složení (tabulka 4.2 str. 40) a postup tavení jako tavba první, tzn. tavba A I a II, a tavba B I a II viz postup tavení str. 40-42.

- **A/I ↓ C – nauhličení před odpichem**
- **A/II ↓ C – nauhličení před odpichem, + B**
- **B/I C – konečný**
- **B/II C – konečný, + B**

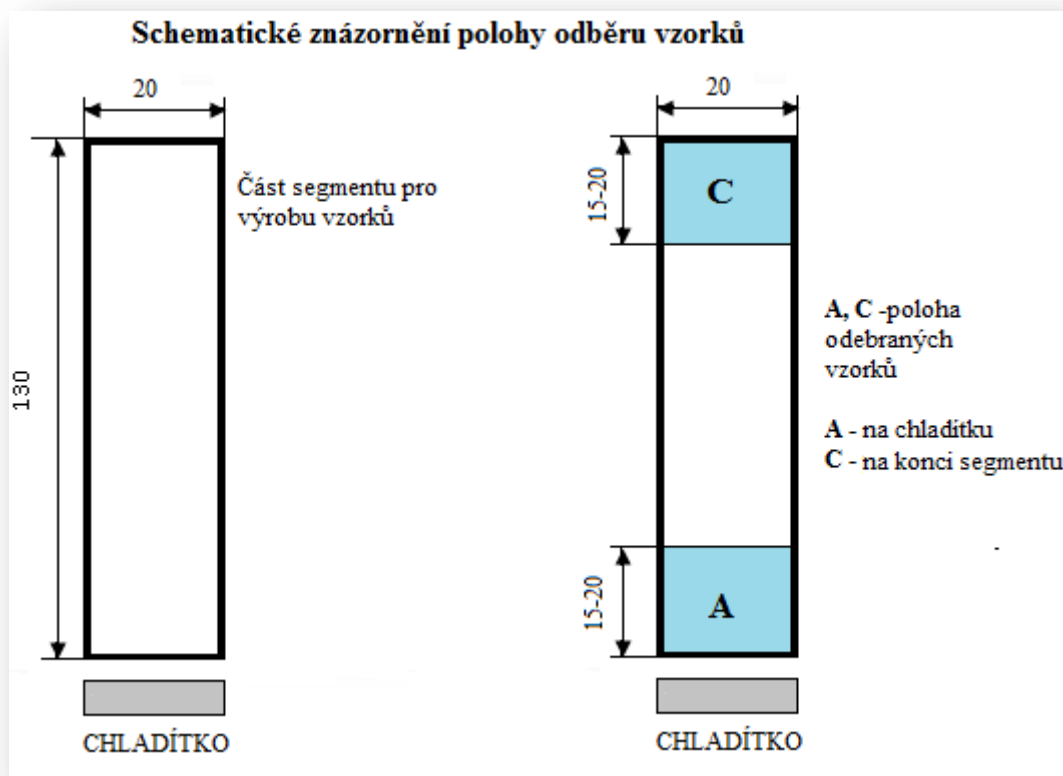
Rozdíl taveb spočívá v tvaru odlívaných vzorků. Zde se použil zkušební odlitek ve tvaru válce o průměru 100mm a výšce 250mm. Na obrázku č. 4.4, je řez formy vyrobené z ST - směsi (křemenný písek, vodní sklo Desil S, tvrdidlo Diacetin: Triacetin – 40:60) vyrobeno ve Vítkovické slévárně s. r. o.



Obrázek 4.4: Řez formy. [Forma navržena z literatury 18, 17]

4.3.1 Výroba vzorku z tavby 2

Po vybití z formy, byly z válců vyříznuty segmenty pomocí vodního paprsku, z nichž viz obr. 4.5, byly odebrány z každého segmentu dva vzorky. Označení vzorků, jejichž zkoumaná plocha byla v bezprostředním styku s chladítkem = **A**. Na konci odlitku = **C**, zkoumaná plocha byla odebrána 100 mm od chladítka.



Obrázek 4.5: Schematické znázornění polohy odběru vzorků.

4.3.2 Zpracování vzorku z tavby 2

Postup metalografického zpracování vzorků je stejný, jako u tavby 1, na straně 43-44.

4.3.3 Výsledné hodnoty vzorků z tavby 2

Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrдость, hodnocení grafitu a mikrostruktur vidíme v tabulce č. 4.6. Hodnocení typu a velikosti grafitu proběhlo podle normy ČSN EN ISO 945 (42 0464). Pořadí hodnocení je následující: **tvar, rozložení a velikost grafitu**.

Tabulka 4.6: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrдость, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.

Tavba 2	Vzorek č. 1A	Vzorek č. 1C	Vzorek č. 2A	Vzorek č. 2C	Vzorek č. 3A	Vzorek č. 3C
	bez B (ze vsázky)	bez B (ze vsázky)	+ B	+B	+B, C	+B, C
Plošný obsah grafitu	6,3%	10,9%	1,08%	4,54%	0,52%	5,5%
Průměrná mikrotvrдость HV_{0,3}	706	403	706	691	786	620
Hodnocení grafitu	I, II; C;	I; A;	III; Gr 6;	I, II; A;	III, V; A;	I; C;
	4,5	1	5	4, 5	7	3
Mikrostruktura	LG, M, TL, Cp 10	LG, M, Cp 4	ČG, M, TL, Cp 40	PG, M, TL, Cp 40	NZG, M, TL, Cp 40	LG, M, TL, Cp 25

I, II, III, V tvar grafitu. A, C rozložení grafitu. 1, 3, 4, 5, 7 velikost grafitu a Cp- cementit- hodnocen v % podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). TL- transformovaný ledeburit, LG- lupínkový grafit, M- martenzit, ČG- červíkovitý grafit, PG- pavoučkovitý grafit, NZG- nedokonale zrnitý grafit.

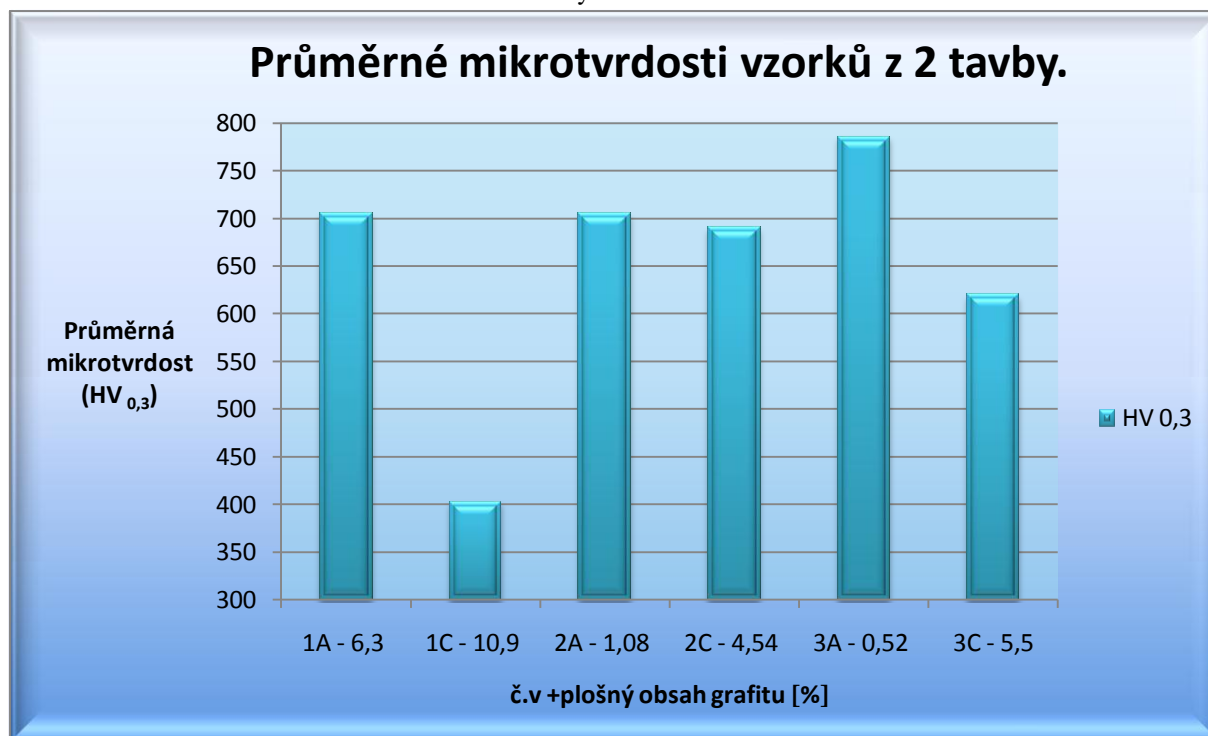
Tabulka 4.7: Chemické složení vzorků 2 tavby.

č. v.	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	B [%]	Ti [%]
1A,1C	3,36	0,93	0,94	0,044	0,005	4,32	1,82	0,4	0,01	0,004	0,018
2A,2C	3,36	0,92	0,9	0,044	0,008	4,33	1,81	0,4	0,01	0,01	0,018
3A,3C	3,44	0,91	0,91	0,052	0,1	4,38	1,92	0,42	0,01	0,1	0,02

➤ **Dílčí závěr:**

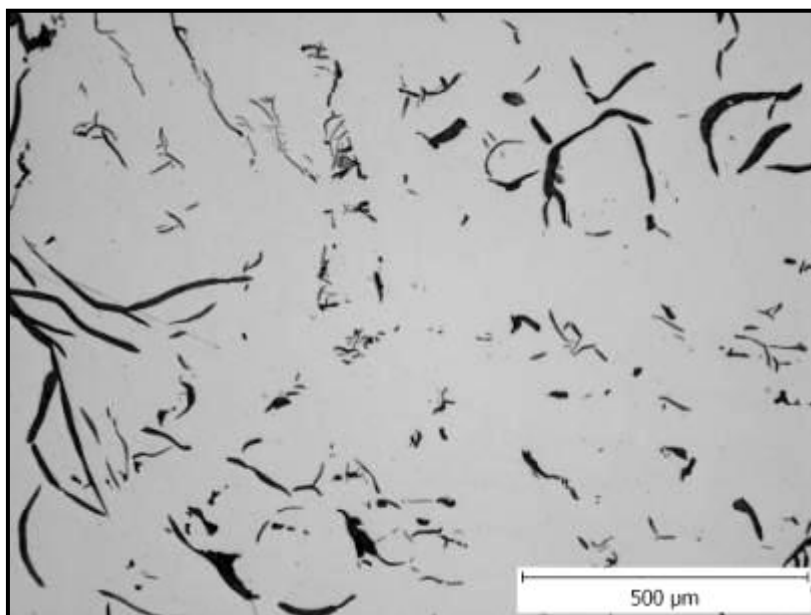
Hodnoty, které vidíme v tabulce č. 4.6, ukazují, že po přidání bóru do taveniny se průměrný obsah grafitu snížil, zmenšila se jeho velikost, zvýšila se průměrná mikrotvrдость a zvýšil se procentový obsah Cp. V případě kombinace přidání bóru společně s nauhličením v vorek (3A) dochází k většímu poklesu obsahu grafitu, ve styku s chladítkem stoupá mikrotvrдость a množství Cp, což se ve vzorku 3C (bez chladítka) opět snižuje. Chemické složení vzorků z druhé tavby vidíme v tabulce č. 4.7. Přehledné uspořádání mikrotvrđosti tavby 2 vidíme v grafu č. 4.3.

Graf č. 4.3: Průměrné mikrotvrđosti vzorků z 2 tavby.

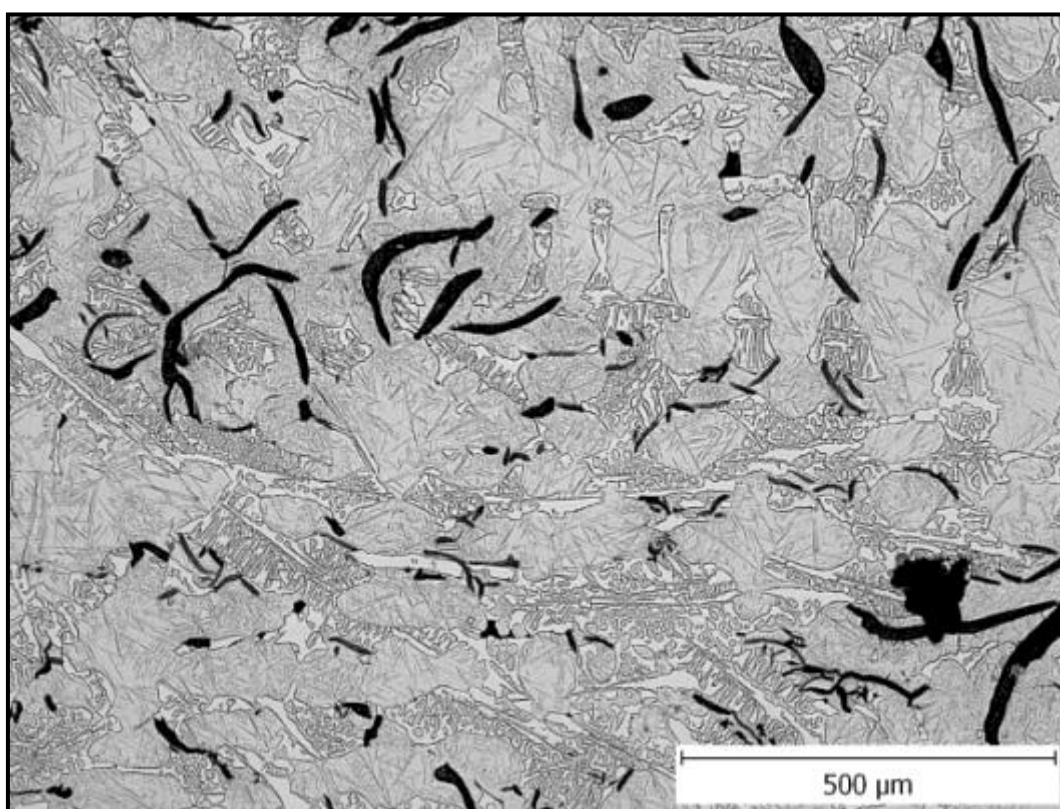


4.3.4 Výsledné struktury

Vzorek číslo: 1A; podíl grafitu: 6,3%; $HV_{0,3}$: 706

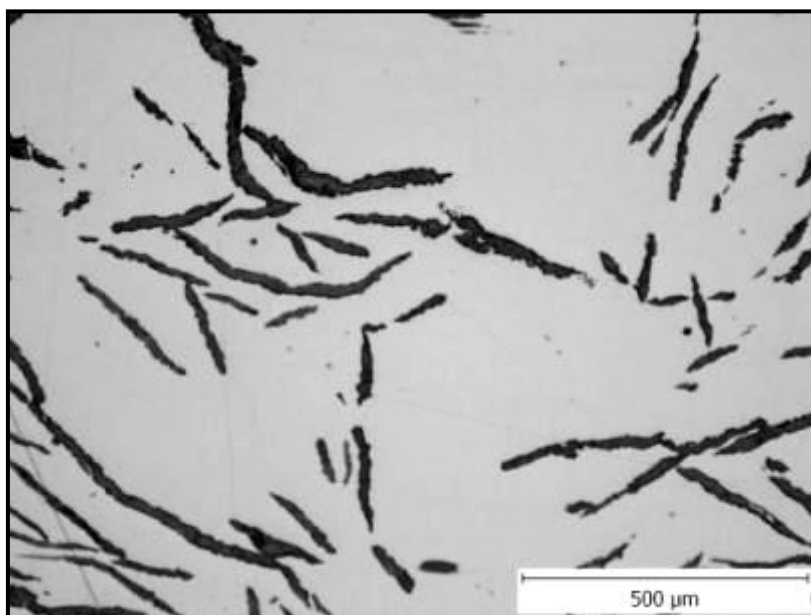


Typ grafitu-neleptáno: I, II; C; 4,5.

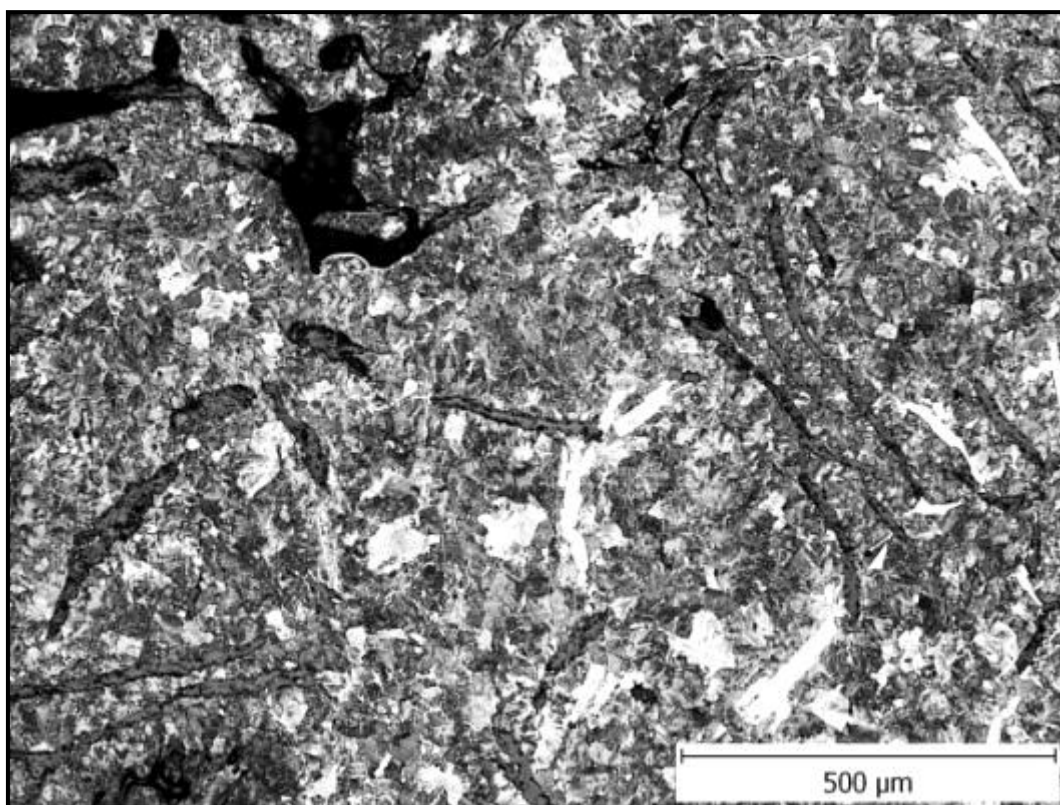


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 10.

Vzorek číslo: 1C; podíl grafitu: 10,9%; $HV_{0,3}$: 403

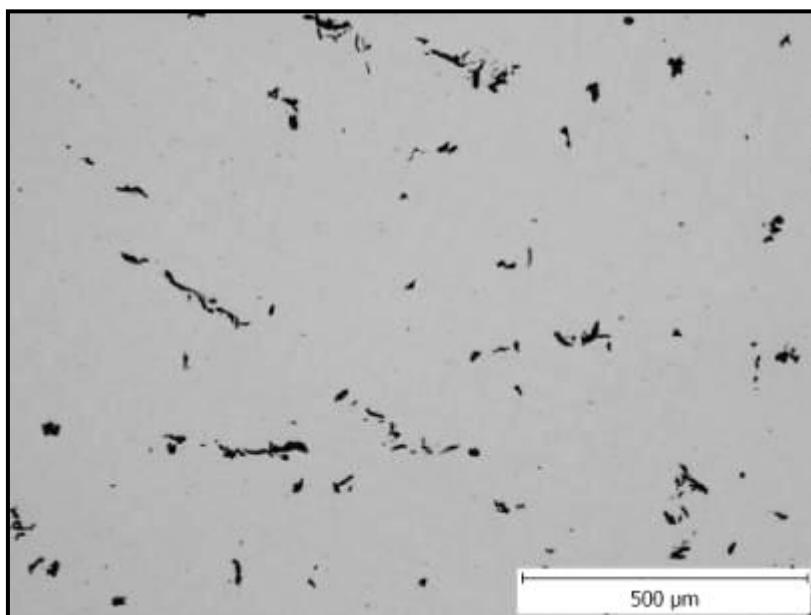


Typ grafitu-neleptáno: I; A; 1.

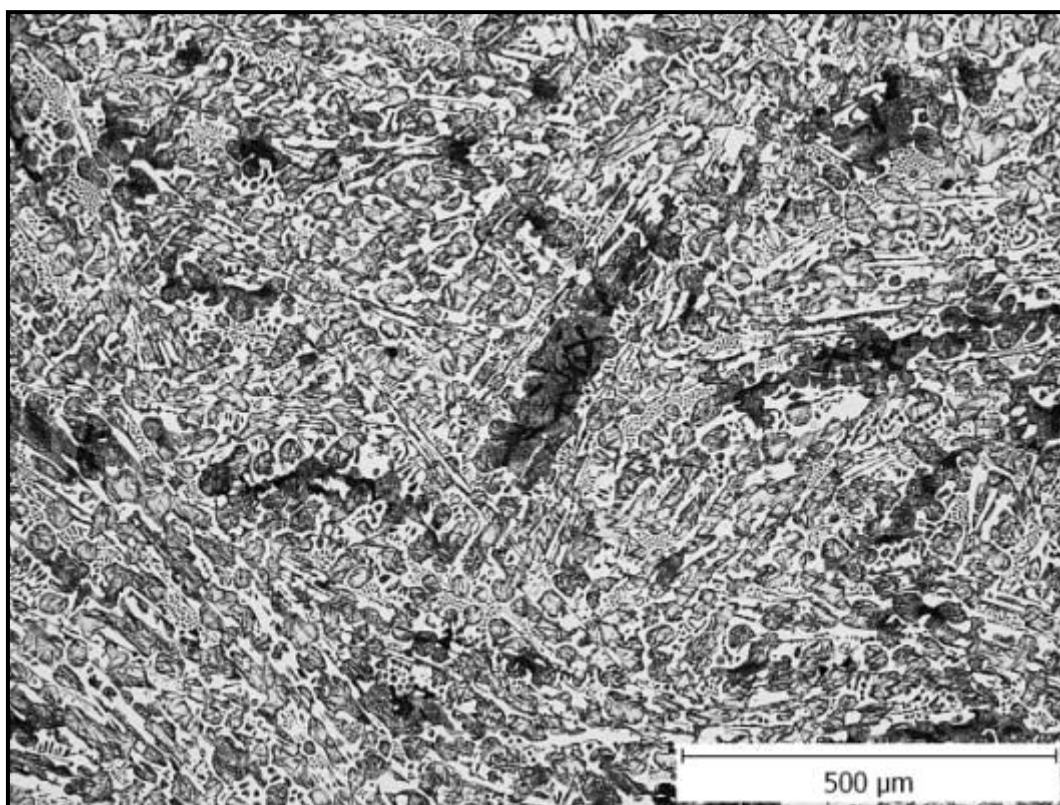


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, Cp 4.

Vzorek číslo: **2A**; podíl grafitu: **1,08%**; $HV_{0,3}$: **706**

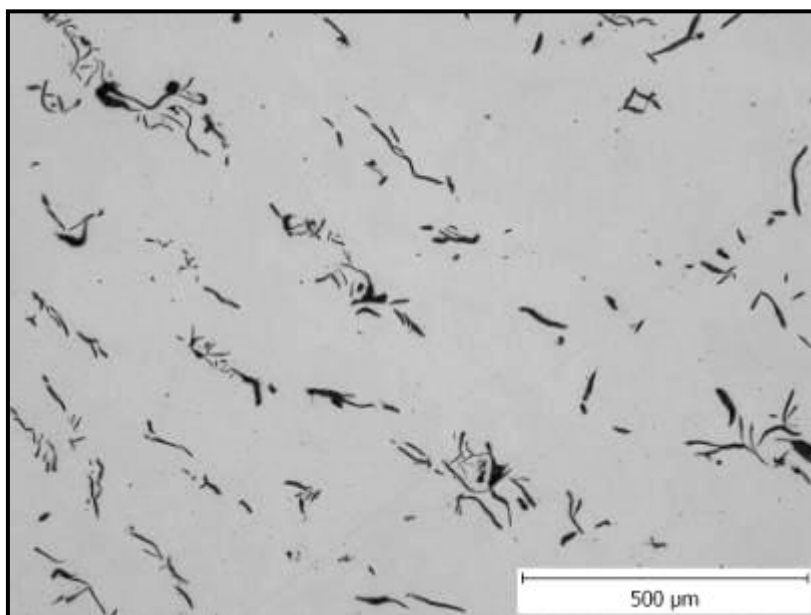


Typ grafitu-neleptáno: III; Gr 6; 5.

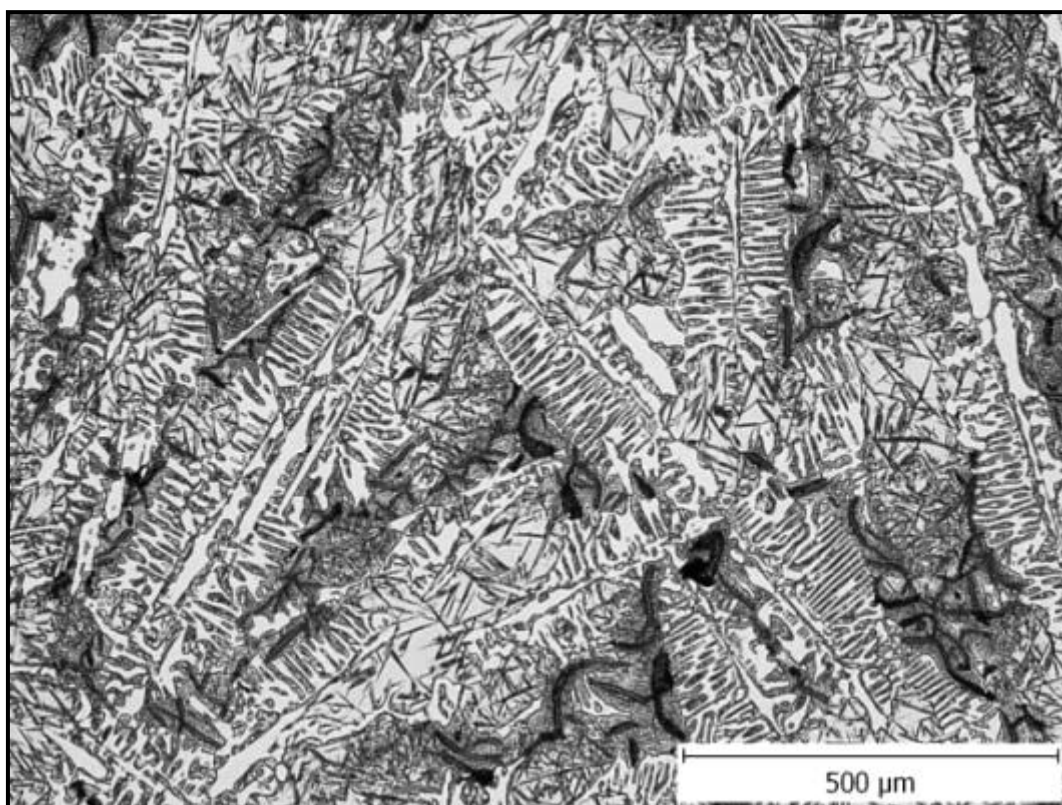


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: ČG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **2C**; podíl grafitu: **4,54%**; $HV_{0,3}$: **691**

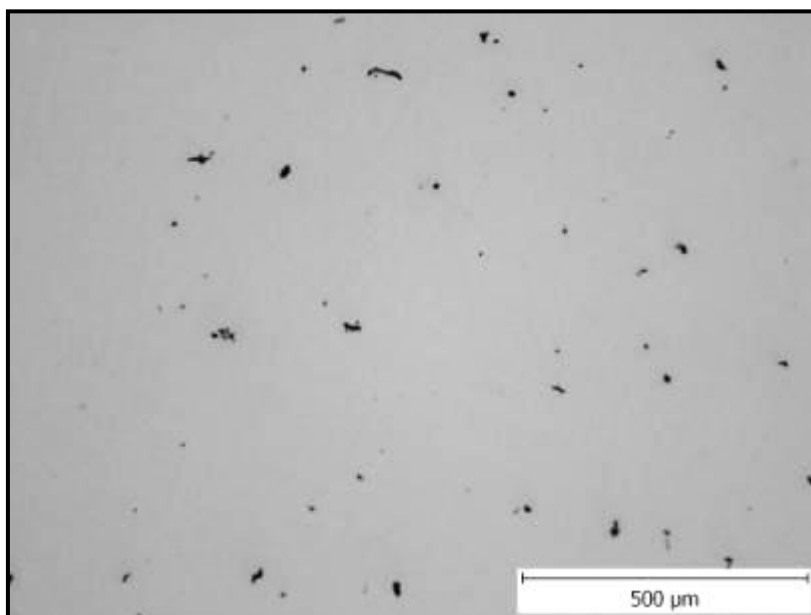


Typ grafitu-neleptáno: I, II; A; 4, 5.

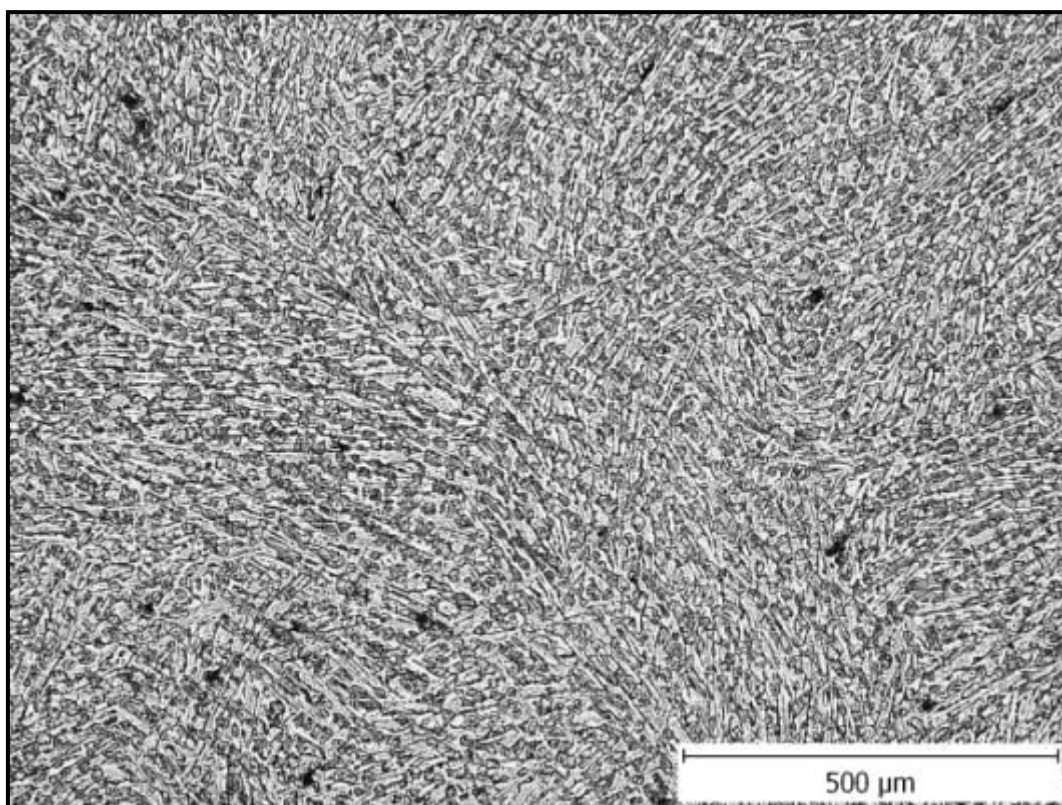


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: PG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **3A**; podíl grafitu: **0,52%**; $HV_{0,3}$: **786**

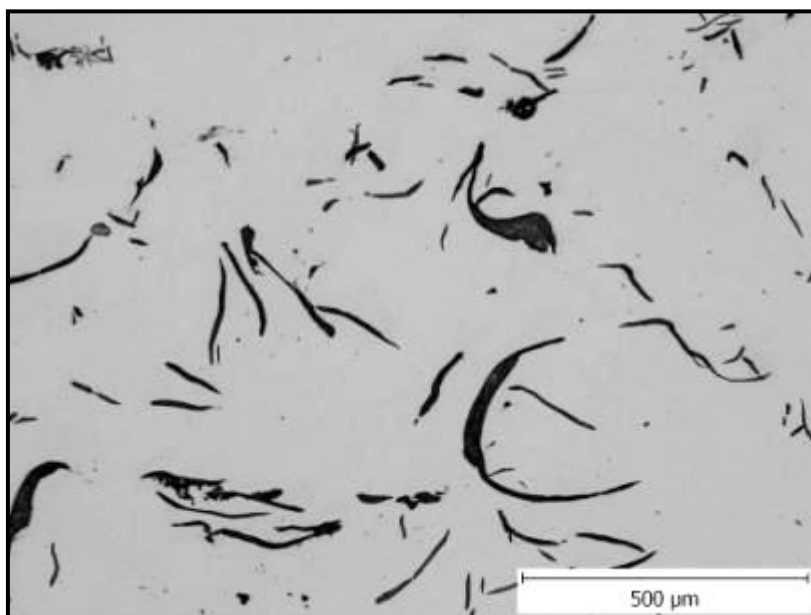


Typ grafitu-neleptáno: III, V; A; 7.

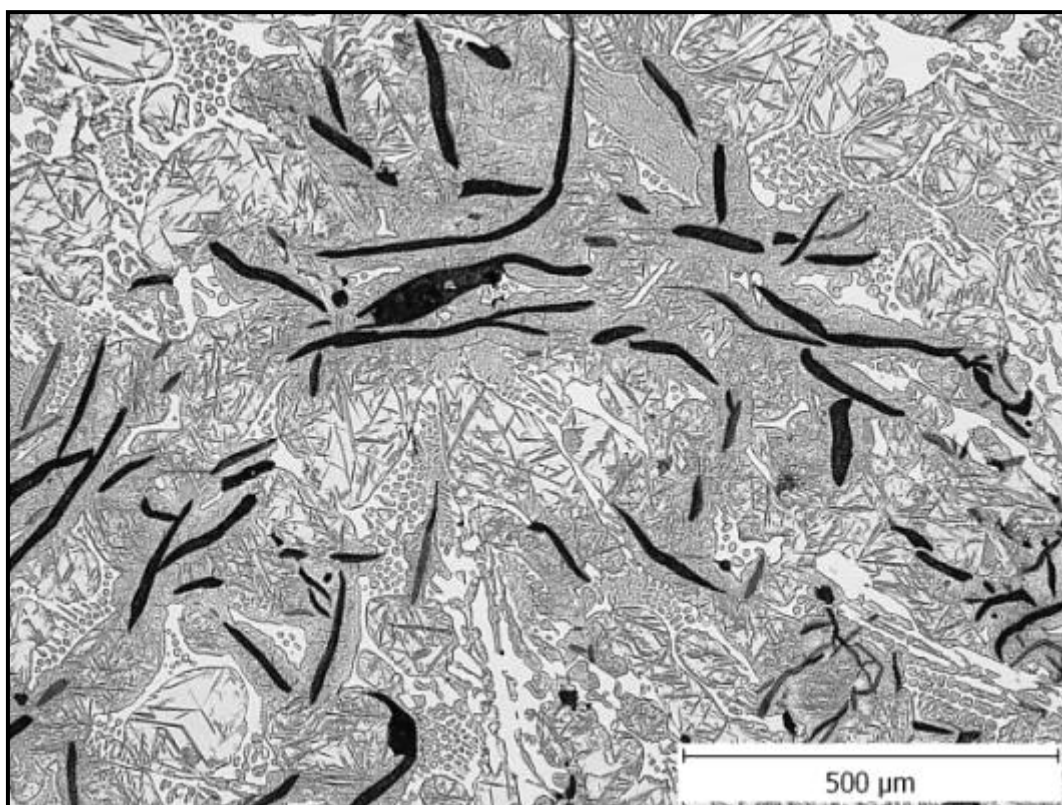


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: NZG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **3C**; podíl grafitu: **5,5%**; $HV_{0,3}$: **620**



Tvar grafitu-neleptáno: I; C; 3.



Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 25.

4.4 Třetí tavba

Byla tavena indefinitní litina (ICPD), za použití vsázky-směrného chemického složení v tabulce č. 4.8. Formy na odlévání byly opět vyrobeny Vítkovickou slévárnou, jako u tavby číslo 2, tzn. za použití ST směsi a chladítek.

- **A/I ↓ C – nauhličení před odpichem, +B a A/II ↓C – nauhličení před odpichem, + ↑ B.**
- **B/I modifikace NiMg a B/II modifikace NiMg,+Mischmetall.**

Tabulka 4.8: Směrné chemické složení vsázky.

Válec	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	B [%]	T _l [°C]
Z	2,67	0,92	0,84	0,040	0,014	1,78	4,40	0,40	0,10	0,020	1 309
B	2,80	0,90	0,83	0,039	0,016	1,82	4,39	0,38	0,10		1 293
P	2,90	0,91	0,85	0,034	0,016	1,70	4,35	0,42	0,10	0,011	
K	3,34	0,90	0,82	0,50	0,018	1,85	4,43	0,41	0,10		

A: tavení při nízkém obsahu uhlíku, nauhličení před odpichem.

Varianta I/ II: Očkování grafitu bórem = A/I ↓ C – nauhličení před odpichem, +B

Pro druhý vzorek bude přidáno k přísadám do pece ↑ FeB = A/II ↓C – nauhličení před odpichem, + ↑ B.

1. Tavení – roztavení připravené suroviny.
2. Po natavení 1340 °C – kontrolní odběr TA, prodleva na této teplotě cca 30 min.
3. Nauhličení – využití TA – teplota likvidu 1220 °C teplota přehřátí max. 1410 °C.
4. Vnesení FeB do pece (využití cca 80% při dávkování do pece), kontrola pomocí TA, očkování v peci: 0,08%Si z LC Graphidox, 0,05%Si z FeSidrc.
5. Kontrolní TA před odpichem.
6. Odpich 1380 °C.
7. Očkování v pánvi: CaMnSi 1,0kg/t, FeMnaff. 0,8kg/t.
8. Lící teplota Tl+100°C.
9. Odlití – penízek pro spektro, technolog. zkouška TA.

B: Modifikace taveniny Mg, za použití předslitiny NiMg.

Varianta I/ II: Modifikace hořčíkem za použití předslitiny NiMg = **B/I m-NiMg**

*Pro druhý vzorek bude přidáno k přísadám pánve 0,7 kg/t Mischmetallu = **B/I m-NiMg+ M***

1. Tavení – roztavení připravené suroviny.
2. Po natavení 1340 °C – kontrolní odběr TA
3. Úprava teploty likvidu na hodnotu 1240°C, teplota přehřátí max. 1410 °C
4. Očkování v peci: 0,04-0,08% Ti z FeTi
5. Odpich 1420°C
6. Očkování v pánvi: 0,20% hm. CarbSic, 0,25% Si z Inoculin 80, 0,25%Si z FeSi drc., 0,80% hm. NiMg, přikrýt třískami.
7. Lící teplota Tl+100°C
8. Odlití – penízek pro spektro, technolog. zkouška, TA.

Cílem přetaveb typu A a B ve variantách I. a II. je získání vzorků pro metalografické rozbory, a zkoušky tvrdosti. Posuzován bude vliv obsahu B na tvar, rozložení a velikost vyloučeného grafitu při jinak stejném očkování.

4.4.1 Výroba vzorků z tavby 3

Výroba vzorků z třetí tavby je stejná, jako u tavby druhé na str. 54.

4.4.2 Zpracování vzorků z tavby 3

Postup metalografického zpracování vzorků je stejný, jako u tavby 1, na straně 43-44.

4.4.3 Výsledné hodnoty vzorků z tavby 3

Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost, hodnocení grafitu a mikrostruktur vidíme v tabulce č. 4.9. Hodnocení typu a velikosti grafitu proběhlo podle normy ČSN EN ISO 945 (42 0464). Pořadí hodnocení grafitu je následující: **tvar, rozložení a velikost grafitu**.

Tabulka 4.9: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.

Tavba 3	Vzorek 5A	Vzorek 5C	Vzorek 6A	Vzorek 6C	Vzorek 7A	Vzorek 7C	Vzorek 8A	Vzorek 8C
	+ B	+ B	+ ↑B	+ ↑B	+Mg	+Mg	Mg+ M	Mg+M
Plošný obsah grafitu	6,3%	4,36%	2,5%	4,6%	1,9%	3,32%	1,08%	1,2%
Průměrná mikrotvrdost HV_{0,3}	632	721	782	621	749	733	664	675
Hodnocení grafitu	I, II; C,	II, III;	III, V;	I, III; C;	V, VI;	V, VI;	V; C;	VI; C;
	D; 2,7	A; 6	A; 6	2, 6	A; 6	C; 5	7	5
Mikrostruktura	LG, PG, M, TL, Cp 10	TL, M, Cp 25	TL, M, Cp 25	LG, M, TL, Cp 40	KG, TL, M, Cp 40	KG, TL, M, Cp 40	KG, M, TL, Cp 40	KG, M, TL, Cp 40

I, II, III, V, VI tvar grafitu. A, C rozložení grafitu. 2, 5, 6, 7 velikost grafitu a Cp- cementit- hodnocen v % podle normy ČSN EN ISO 945 (42 046). TL- transformovaný ledeburit, LG- lupínkový grafit, KG- kuličkový grafit. PG- pavoučkovitý grafit, M- martenzit.

Tabulka 4.10: Chemické složení vzorků 3 tavby

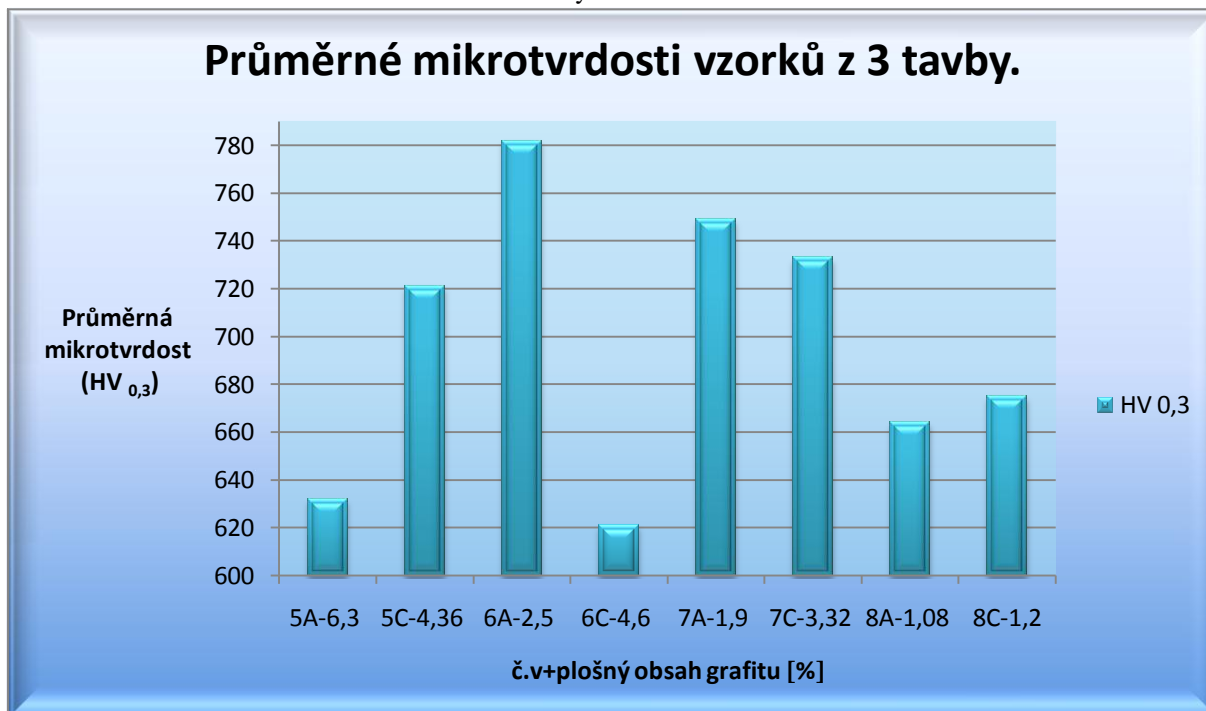
č. v.	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	B [%]	Ti [%]	Mg [%]
5A,5C	3,4	0,94	1,03	0,05	0,01	4,35	1,7	0,42	0,01	0,091	0,022	-
6A,6C	3,38	0,95	1,05	0,051	0,015	4,34	1,69	0,42	0,01	0,118	0,022	-
7A,7C	3,37	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-	0,08
8A,8C	3,35	0,94	1	0,068	0,015	4,64	1,68	0,51	0,01	-	0,045	0,08

➤ Dílčí závěr:

Hodnoty, které vidíme v tabulce č. 4.9, ukazují, že po navýšení obsahu bóru do taveniny z 0,091% na 0,118% se plošný obsah grafitu snížil při styku vzorku s chladítkem, zmenšila se jeho velikost, zvýšila se průměrná mikrotvrdost a procentový obsah Cp. Po přidání Mg se změnil tvar grafitu (modifikace), a taktéž se tím zvýšila mikrotvrdost, obsah Cp zůstává vysoký. V tavbě s použitím Mg, jako modifikátoru, bez bóru je patrný vliv na tvar grafitu z I na V a VI. V, a také roste mikrotvrdost materiálu.

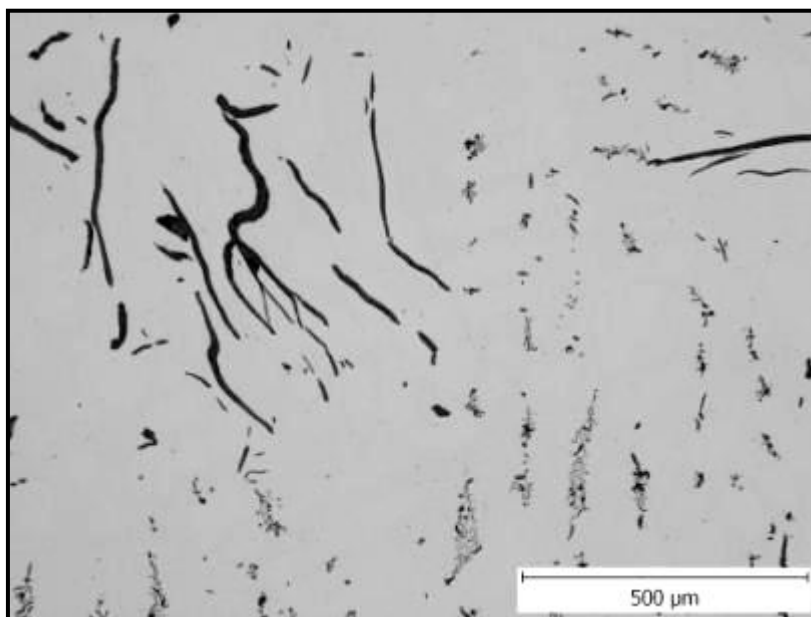
V případě kombinace přidání Mg společně s mischmetalem, dochází k největšímu poklesu průměrného obsahu grafitu a ve styku s chladítkem stoupá mikrotvrdomost. Chemické složení vzorků z 3 tavby vidíme v tabulce č. 4.10. Přehledné uspořádání mikrotvrdomostí tavby 3 vidíme v grafu č. 4.4.

Graf č. 4.4: Průměrné mikrotvrdomosti vzorků z 3 tavby.

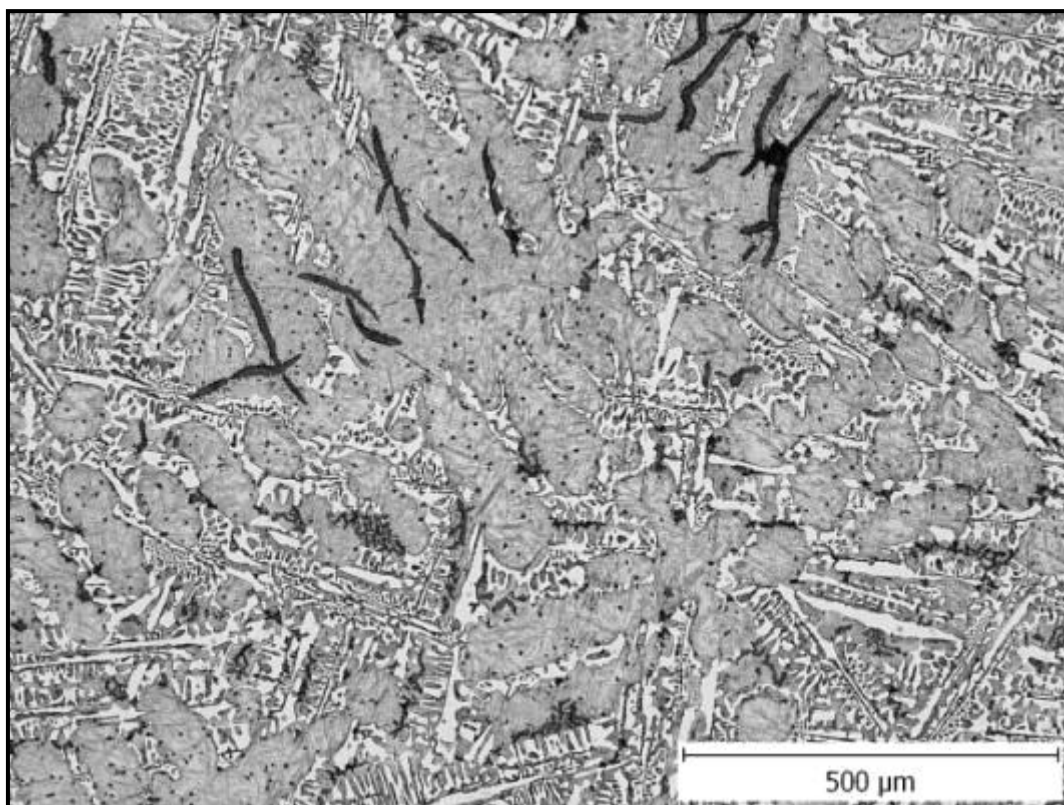


4.4.4 Výsledné struktury

Vzorek číslo: **5A**; podíl grafitu: **6,3%**; $HV_{0,3}$: **632**

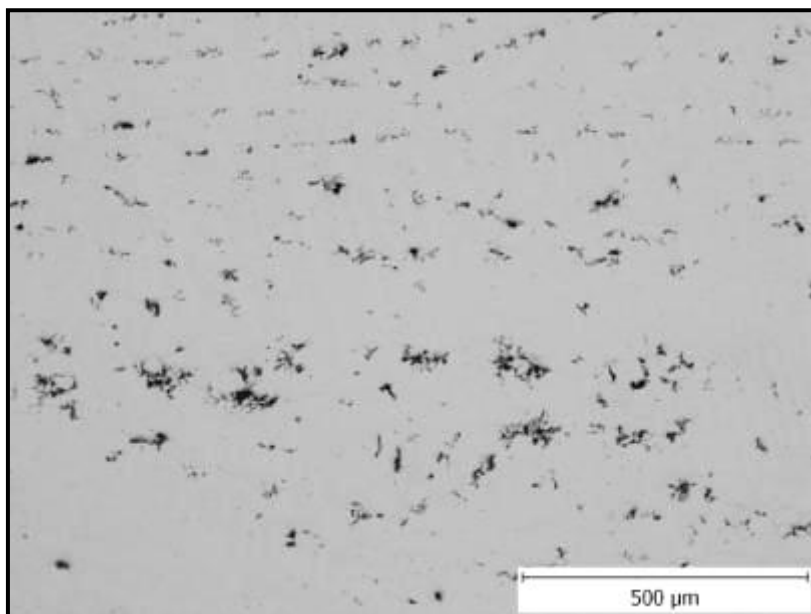


Typ grafitu-neleptáno: I, II; C, D; 2,7.

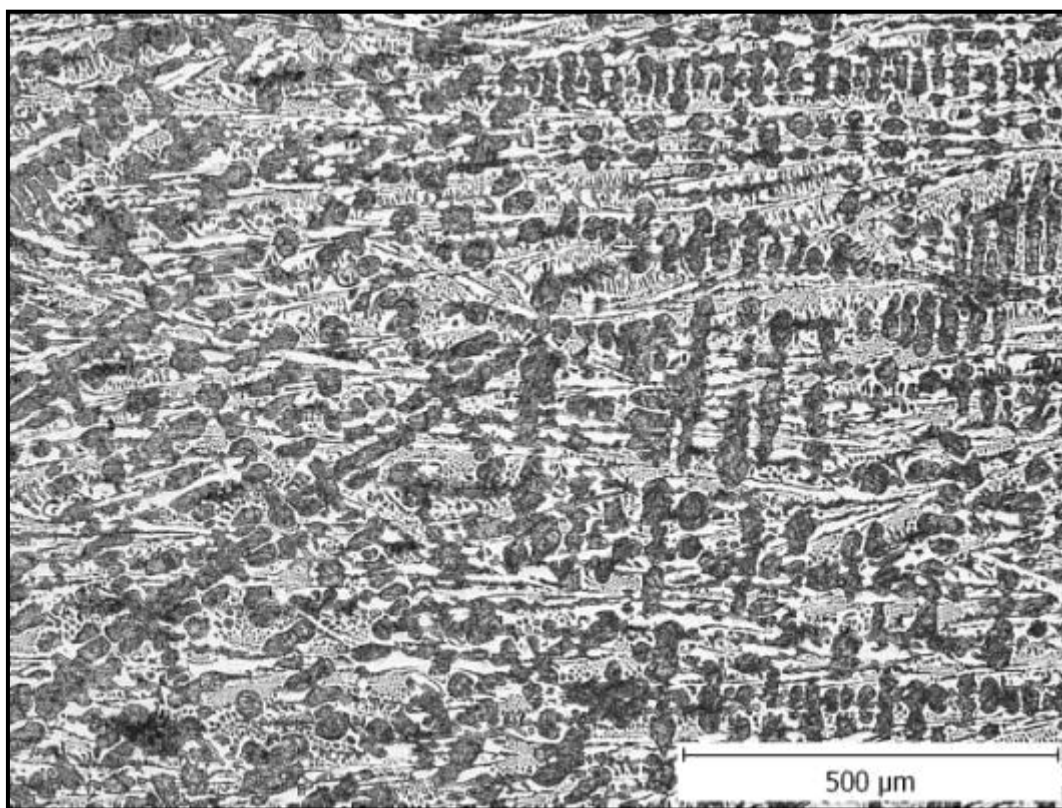


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: LG, PG, M, TL, Cp 10.

Vzorek číslo: **5C**; podíl grafitu: **4,36%**; $HV_{0,3}$: **721**

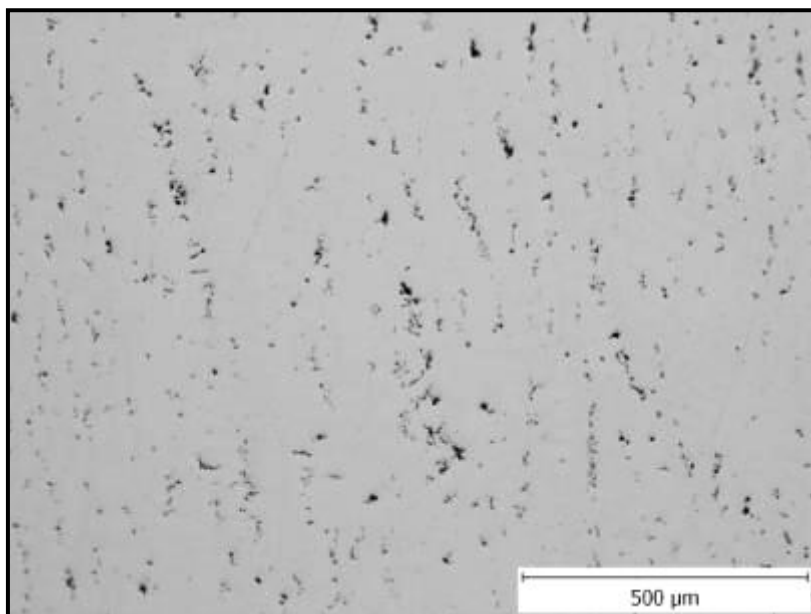


Typ grafitu-neleptáno: II, III; A; 6.

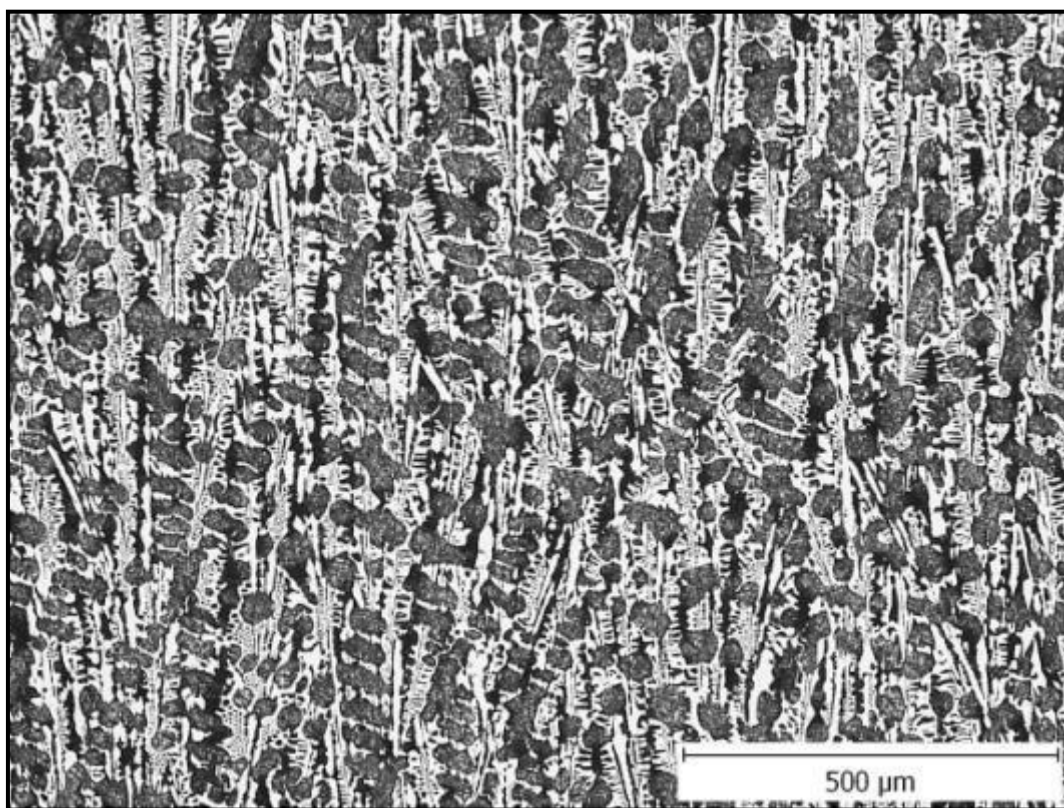


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: TL, M, Cp 25.

Vzorek číslo: **6A**; podíl grafitu: **2,5%**; $HV_{0,3}$: **782**

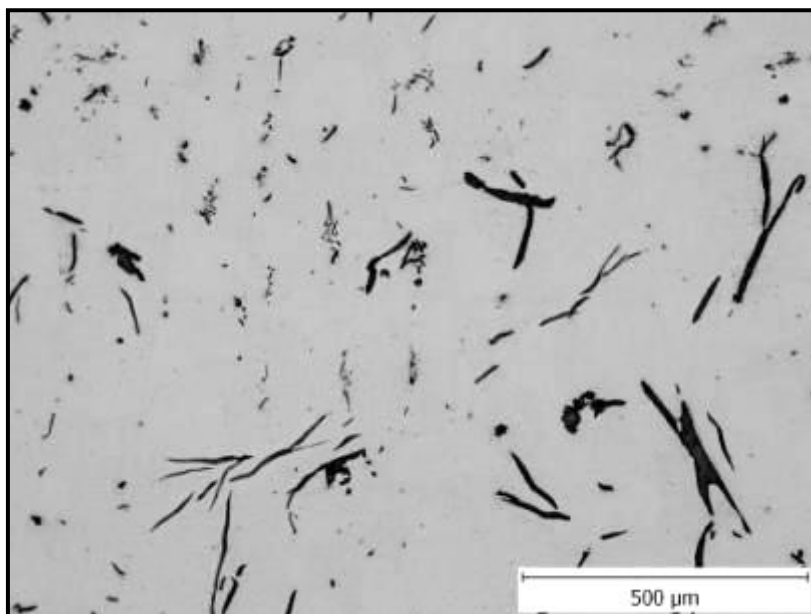


Typ grafitu-neleptáno: III, V; A; 6.

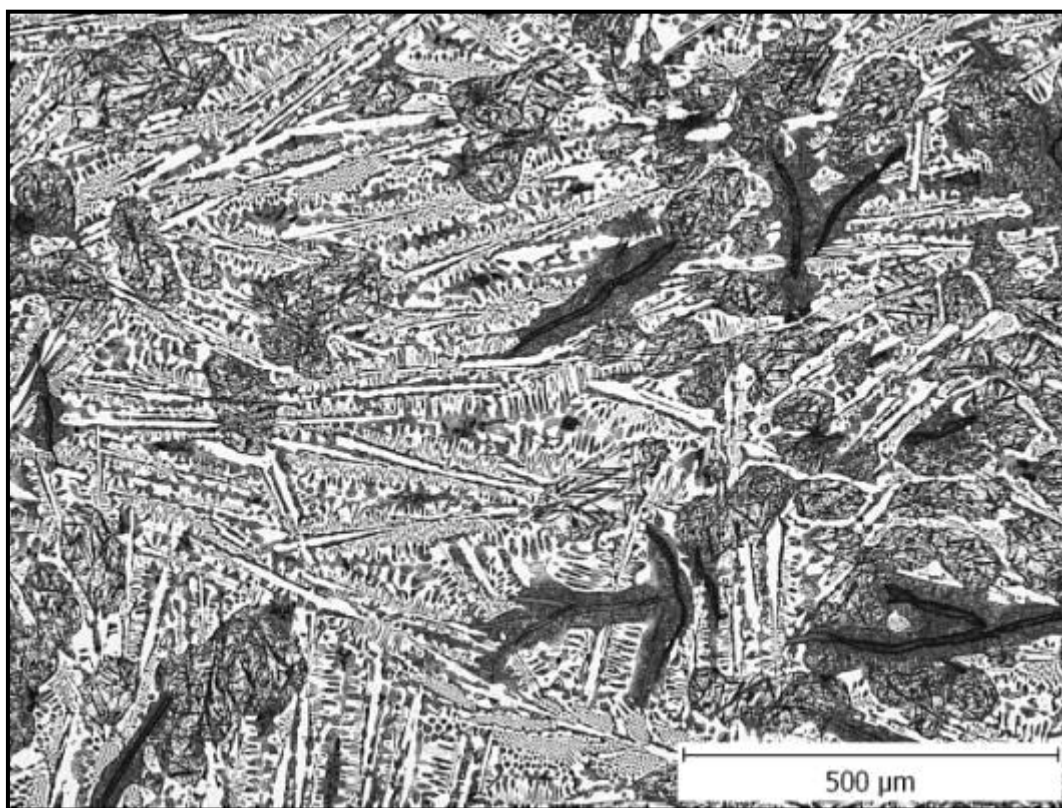


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: TL, M, Cp 25.

Vzorek číslo: **6C**; podíl grafitu: **4,6%**; $HV_{0,3}$: **621**

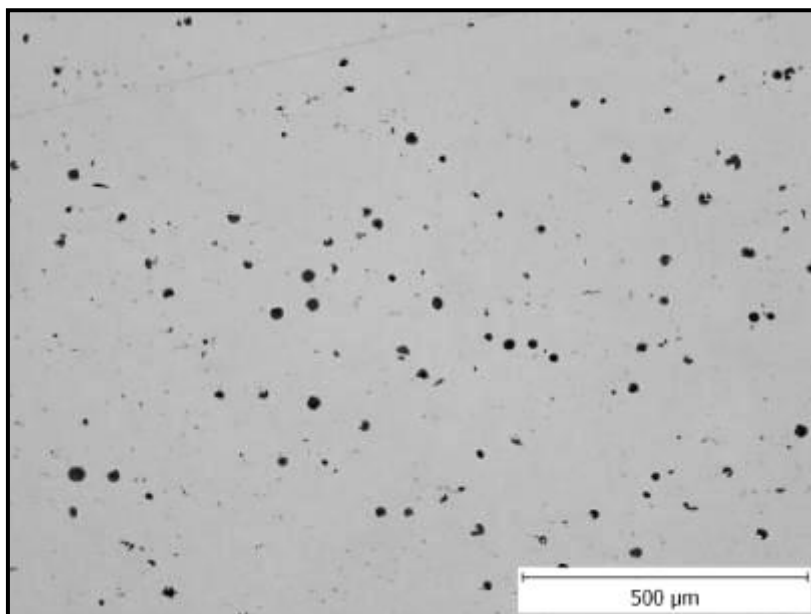


Typ grafitu-neleptáno: I, III; C; 2, 6.

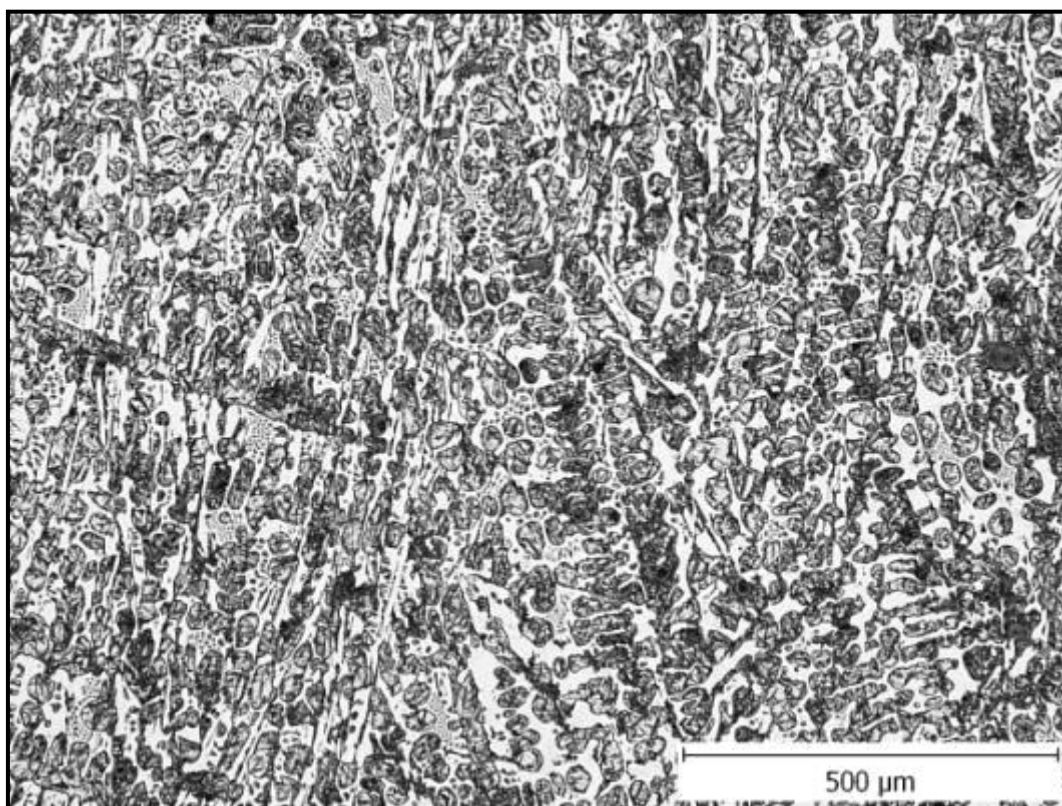


Mikrotrvdosti-leptáno 4% HNO₃, 100x zvětšeno: LG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: 7A; podíl grafitu: 1,9%; $HV_{0,3}$: 749

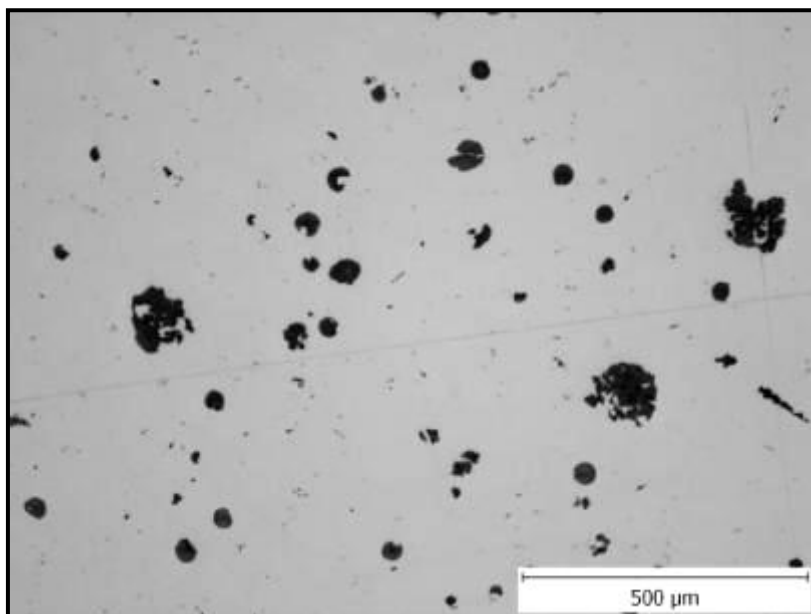


Typ grafitu-neleptáno: V, VI; A; 6.

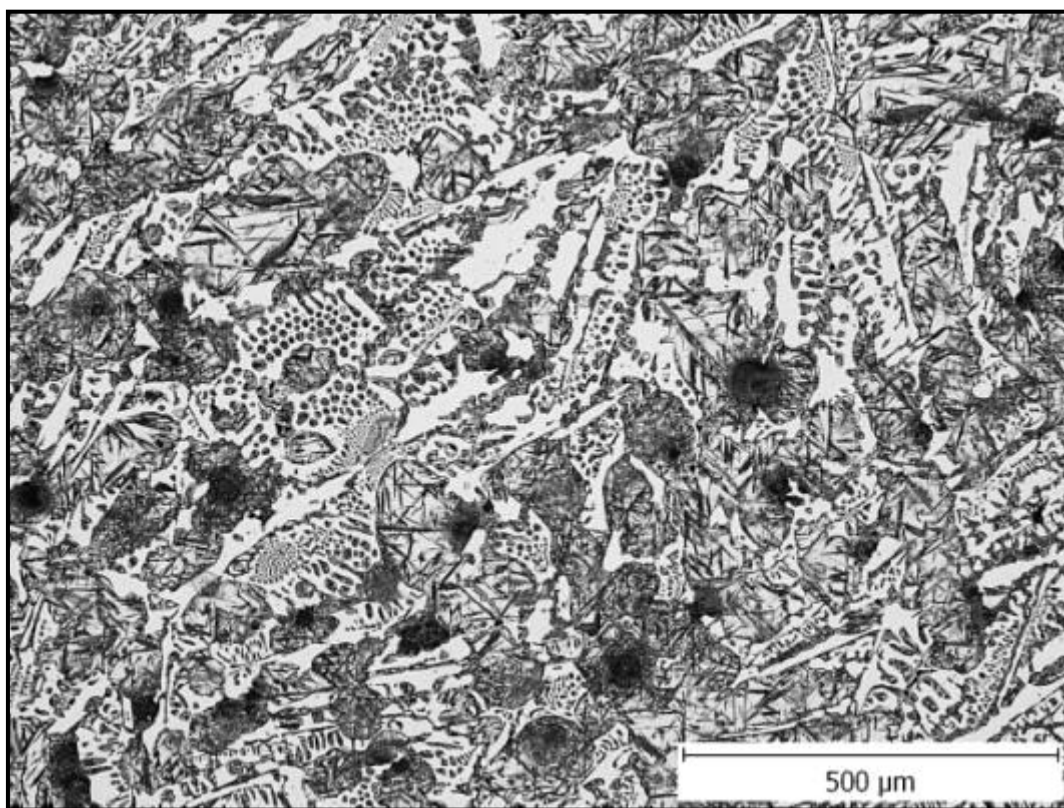


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: KG, TL, M, Cp 40.

Vzorek číslo: **7C**; podíl grafitu: **3,32%**; $HV_{0,3}$: **733**

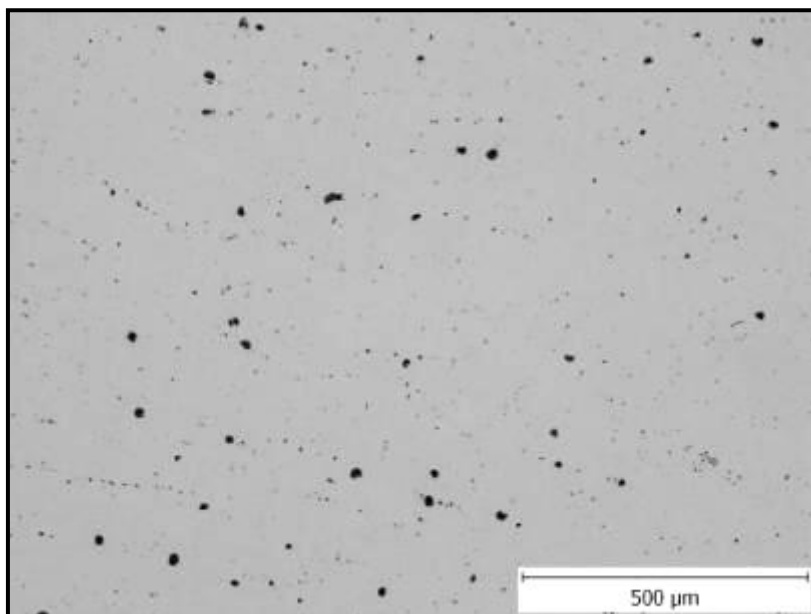


Typ grafitu-neleptáno: V, VI; C, 5.

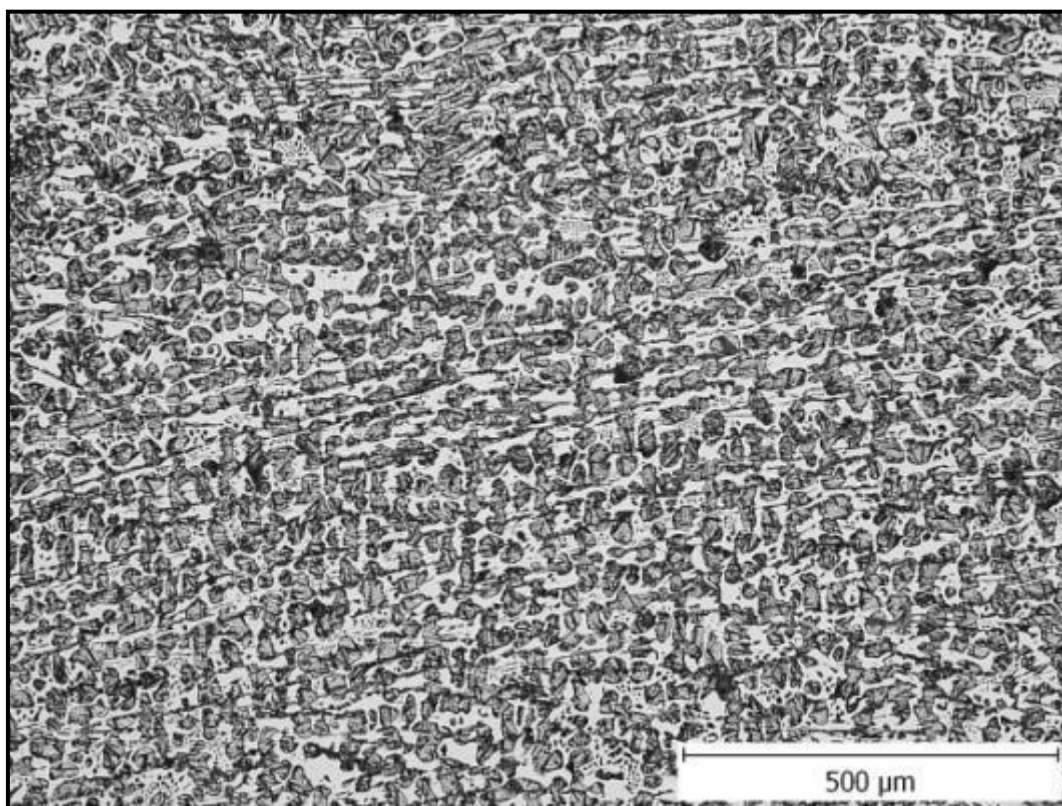


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: KG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: **8A**; podíl grafitu: **1,08%**; $HV_{0,3}$: **664**

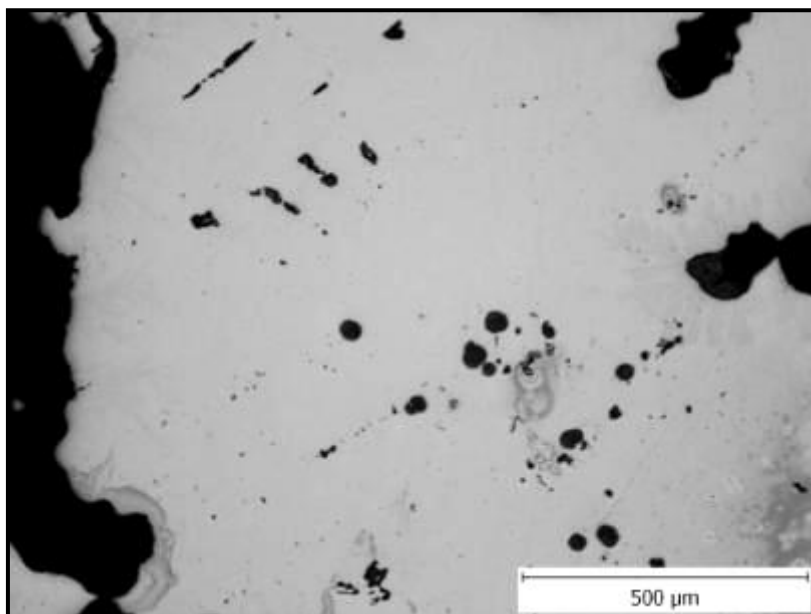


Typ grafitu-neleptáno: V; C; 7.

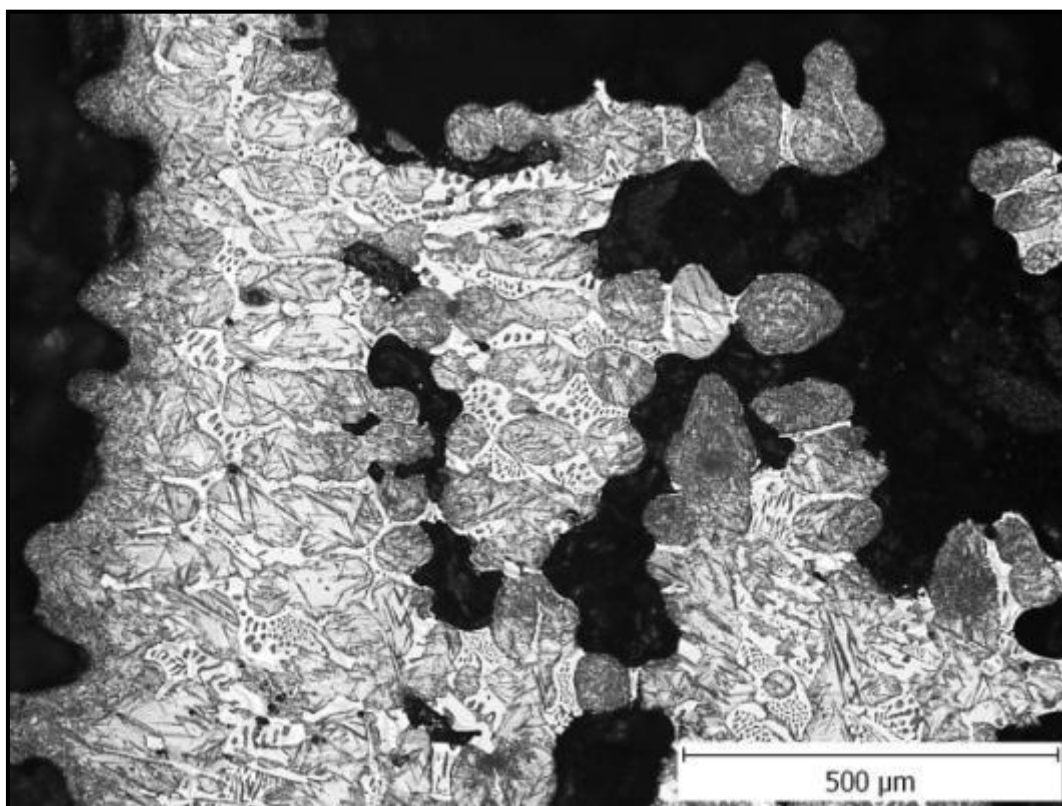


Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: KG, M, TL, Cp 40.

Vzorek číslo: 8C; podíl grafitu: 1,2%; $HV_{0,3}$: 675



Typ grafitu-neleptáno: VI; C; 5.



Mikrostruktura-leptáno 4% HNO_3 , 100x zvětšeno: KG, M, TL, Cp 40.

5. Závěrečné zhodnocení výsledků a cílů práce

Z provedených experimentálních taveb vyplývá, že bór má výrazný vliv na plošný podíl, rozložení a tvar grafitu v ICDP litině používané na pracovní vrstvu odstředivě litých válců. Bór přidávaný v malých množstvích do litiny ovlivňuje též základní kovovou hmotu litiny tvořenou ledeburitem. Indefinitní litina (ICDP) musí mít vysokou povrchovou tvrdost (otěruvzdornost), která v průběhu provozu válce nesmí výrazně klesat ani po opakovaném úběru (přebroušení) pracovní plochy válce.

Experimentálními tavnami bylo prokázáno zjemnění vyloučeného grafitu v ICDP litině a snížení jeho plošného obsahu a to z **6,3%** na **1,08%** - tavba 2. Průměrná mikrotvrdost vzorků je vyšší v oblasti styku odlitku s chladítkem (viz tabulka č. 4.6 na str. 55).

Vyhodnocením experimentálních taveb při zvolených obsazích od **0,01%** do max. **0,118%** bóru, bylo zjištěno, že zvýšené množství bóru vede ke zvýšení průměrné mikrotvrdosti ZKH. Množství **0,01%B = 706 HV_{0,3}** a **0,118%B = 782 HV_{0,3}**. Zvyšování obsahu B způsobilo snížení podílu plošného obsahu grafitu v mikrostruktuře z **6,3%** při obsahu **0,004%B** (ze vsázky) na **2,5%** při obsahu **0,118%B** (zvolený obsah).

Výsledky taveb dokumentují změny způsobené přidáním bóru a dalších prvků:

- *Tavba č. 2, bez přidání bóru (0,004% B-ze vsázky) vzorek (1A) zkušebního odlitku, který byl v přímém styku s chladítkem (dále jen chladítko):* má plošný obsah grafitu na metalografickém výbrusu **6,3%** a průměrnou hodnotu mikrotvrdosti **706 HV_{0,3}**.
- *Tavba č. 2, vzorek (1C) bez přidání bóru (0,004% B-ze vsázky), který byl odebrán ve vzdálenosti 100 mm od chladítka (dále jen bez chladítka):* má plošný podíl grafitu **10,9%** a sníženou průměrnou hodnotu mikrotvrdosti **403 HV_{0,3}** způsobenou delší dobou tuhnutí zkušebního odlitku.
- *Tavba č. 2, vzorek (2A- chladítko) po přidání B:* Zvýšení obsahu bóru na hodnotu 0,01% způsobil pokles plošného obsahu grafitu z **6,3%** na **1,08%**. Mikrotvrdost zůstává v tomto případě stejná.
- *Tavba č. 2, vzorek (3A - chladítko) s bórem a vyšším obsahem uhlíku (z 3,36% na 3,44% C):* V tomto případě klesl obsah až na **0,52%** plošného podílu

grafitu, což je pod spodní hranicí požadované tolerance = 1 - 4%, ale mikrotvrdot vzrostla, až na **786 HV_{0,3}**.

- *Tavba č. 3, vzorek (5A- chladítko):* V třetí tavbě byla průměrná mikrotvrdot vzorků 5A s obsahem bóru **0,091%** - **632 HV_{0,3}**. U vzorku 6A (*chladítko*), po zvýšení obsahu bóru z **0,091%** na **0,118%** klesl plošný obsah grafitu z **6,3%** na **2,5%** a průměrná mikrotvrdot vzrostla z **632 HV_{0,3}** na **782 HV_{0,3}**.
- *Tavba č. 3, vzorek (7A- chladítko):* Použitím Mg byly taktéž ovlivněny vlastnosti materiálu – průměrná mikrotvrdot, tvar a plošné rozložení grafitu. V tomto případě mikrotvrdot vzrostla na **749 HV_{0,3}**, za použití KVZ (kovy vzácných zemin-mischmetall) k prodloužení modifikačního účinku - vzorky 8A (*chladítko*) a 8C (*bez chladítka*), dochází ke snížení plošného obsahu grafitu až na **1,08%** ve styku s chladítkem a k menší velikosti grafitu = 7.

Požadovaný plošný podíl grafitu v ideální litině je od **1 - 4%**. V případě nižšího podílu grafitu může docházet k nárůstu pnutí ve válci, což může vést k jeho následnému prasknutí. Proto je důležité dodržovat požadované rozmezí plošného obsahu grafitu při současném dosažení maximální tvrdosti pracovní vrstvy v tzv. plášťové litině, aby k těmto vadám nedocházelo.

6. Seznam použité literatury

- [1] VONDRÁK, V; HAMPL, J; HANUS, A. *Metalurgie litin: Mimopecní zpracování roztavené litiny*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0777-7.
- [2] ROUČKA, J.: *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: VUT, 1998, s.166. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] JELÍNEK, P.: *Slévárenství*. Vyd. 4. Ostrava: VŠB-TUO, 2000, 256 s. ISBN 80-7078-952-2.
- [4] GEDEONOVÁ, Z; JELČ, I.: *Metalurgia liatin*. Vyd. 1. Košice: HF TU, 2000, 288 s. ISBN 80-7099-516-5.
- [5] ANGUS, H. T.: *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*. Vyd. 2. Londýn, 1976, 542 s. ISBN 0-408-70688-0.
- [6] GIRŠOVIČ, N. G.: *Šedá litina Kniha I: Krystalizace litiny a vznik její struktury, vlastnosti litiny*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. 347 s.
- [7] GIRŠOVIČ, N. G.: *Šedá litina Kniha II: Odličky z litiny – tavení litiny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. 347 s.
- [8] VONDRÁK, V.: *Sekundární metalurgie litin*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, 1996, 98 s. ISBN 80-7078-324-9.
- [9] NÝVLT, J. a kol.: *The kinetics of industrial crystallization*. Praha, 1985, s. 105.
- [10] NELIBOVÁ, V; VONDRÁK, V. Nové poznatky v oblasti očkování. In *Výzkum a vývoj ve slévárenství*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, 2005. s. 128-131. ISBN 80-248-0899-4.
- [11] MYSLIVEC, T.: *Fyzikálně chemické základy ocelářství*. Vyd. 2. Praha: SNTL, 1971. 445 s.
- [12] NEUMANN, F.: *Gußeisen : Shmelztechnik, Metallurgie, Schmelzbehandlung*. Vyd. 2. Expert-Verlag, 1999. 452 s. ISBN 3-8169-1728-3.
- [13] BAUER, W.: *Die Auswirkung kleiner Borgehalte auf die Ferrit/Perlitbildung im Gusseisen*, Giesserei 96, Technologie & trends, č. 04/2009, 2009.
- [14] SKALAND, T.: Odezňování očkovacího účinku v litině. *Slévárenství*. 1992, č. 6, s. 240-244. ISSN 0037-6825.
- [15] RÖDTER, H.: Proč je očkování při výrobě odlitků z litiny s kuličkovým grafitem tak důležité?. *Slévárenství*. 2003, 10-11, s. 389-391. ISSN 0037-6825.
- [16] ČSN EN ISO 945 (420464), *Litina – určení mikrostruktury grafitu*, 1. 7. 1996.

- [17] KUBO, Osamu, et al. Effects of Boron and Aluminium on Graphite Structure in Ni-hard Cast iron for Rolling Mill Roll. *JFS*. 2005, 3, s. 179-784.
- [18] Firemní materiály Vítkovické slévárny, s. r. o

PŘÍLOHY

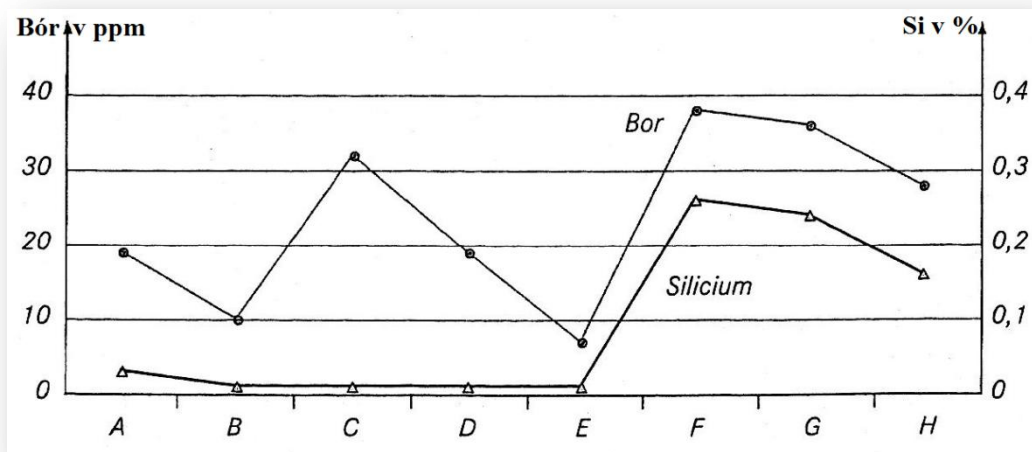
Seznam příloh:

1. Tabulka a obrázek – vlivu křemíku na propal bóru v tavenině.
2. Fotodokumentace vzorků z Vítkovických válců.
3. Tavba 1: tvary odlitků, fotodokumentace vzorků.
4. Tavba 2: fotodokumentace vzorků.
5. Tavba 3: fotodokumentace vzorků.
6. Výsledné struktury několika vzorků 500x zvětšeno.
7. Seznam obrázků.
8. Seznam tabulek.
9. Seznam grafů.

Příloha 1: Propal bóru, podle obsahu křemíku.

Tavba	Průběh	C v %	Si v %	B v ppm
1.	Vsázka	4,22	0,14	<5
	Před přidáním FeB	3,99	0,02	<5
	Po přidání FeB	n. b.	0,02	42
	10 min. po 1. výdrž na teplotě	3,92	0,01	8
	10 min. po 2. výdrž na teplotě	3,83	0,01	<5
2.	Vsázka + 0,25% FeSi	4,22	0,33	<5
	Před přidáním FeB	4,01	0,25	<5
	Po přidání FeB	n. b.	0,25	40
	10 min. po 1 výdrž na teplotě	3,97	0,16	32
	10 min. po 2 výdrž na teplotě	3,94	0,07	21
3.	Tavba 1 a 2	4,29	0,03	19
	Před přidáním FeB	3,91	0,01	10
	Po přidání FeB	3,95	0,01	32
	10 min. výdrž	3,94	0,01	19
	10 min. po 1 výdrž na teplotě	3,88	0,01	7
	Po přidání FeB, 0,4 % FeSi a 0,3% nauhlčovadla	4,05	0,26	38
	10 min. výdrž	4,08	0,24	36
	10 min. po 2 výdrž na teplotě	4,05	0,16	28

Propal bóru podle obsahu křemíku. [13]



Propal bóru v přítomnosti křemíku: **A** – vsázka; **B** – před přidáním bóru; **C** – po přidání bóru; **D** – 10 min. výdrž; **E** – 10 min výdrž na teplotě; **F** – po přidání B, Si a C; **G** – 10 min. výdrž na teplotě; **H** – 10 min. výdrž na teplotě.[13]

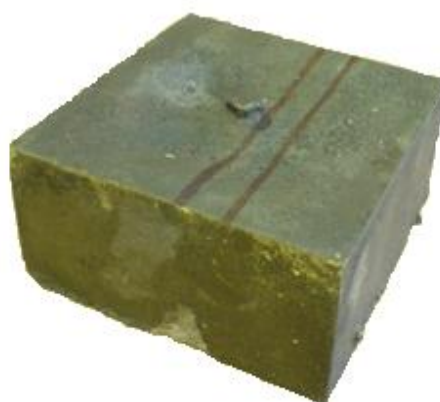
Příloha 2: Fotodokumentace vzorků z Vítkovických válců.



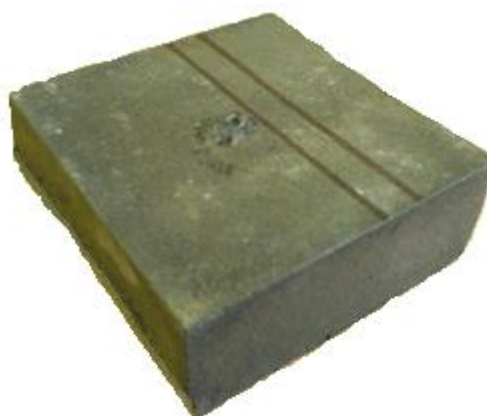
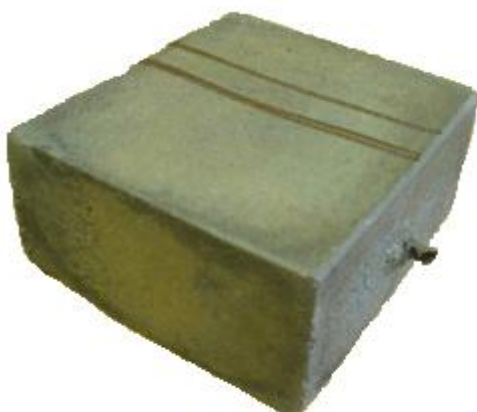


Příloha 3: Tab. 1: tvary odlitků: Popis velikostí kostek, které byly odlity na výrobu vzorků 1,2,3,5,6,7,8.

vzorek č. 1: 100×100×80	vzorek č. 2: 100×100×50
--------------------------------	--------------------------------



vzorek č. 3: 100×90×45	vzorek č. 5: 100×100×30
-------------------------------	--------------------------------



vzorek č. 6: 100×45×40

vzorek č. 7: 100×45×20

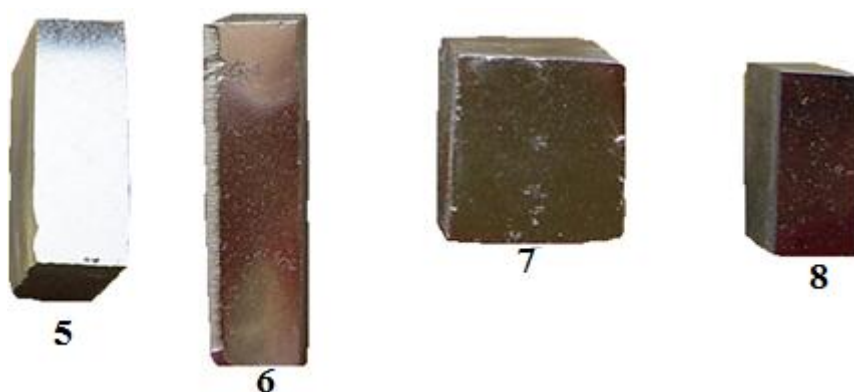


vzorek č. 8: 100×100×10

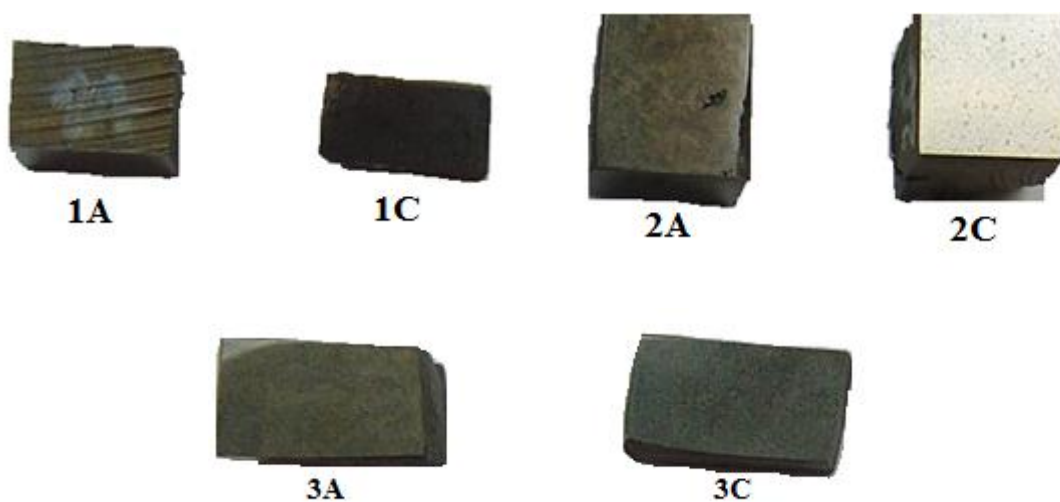


➤ **Fotodokumentace vzorků-tavba 1.**



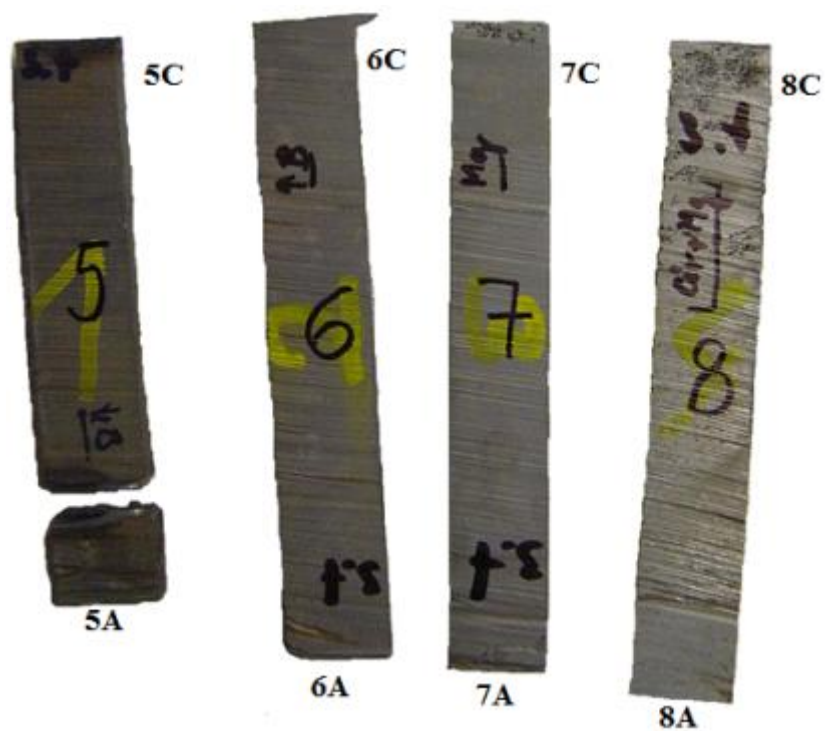


Příloha 4: Tavba 2: fotodokumentace vzorků.

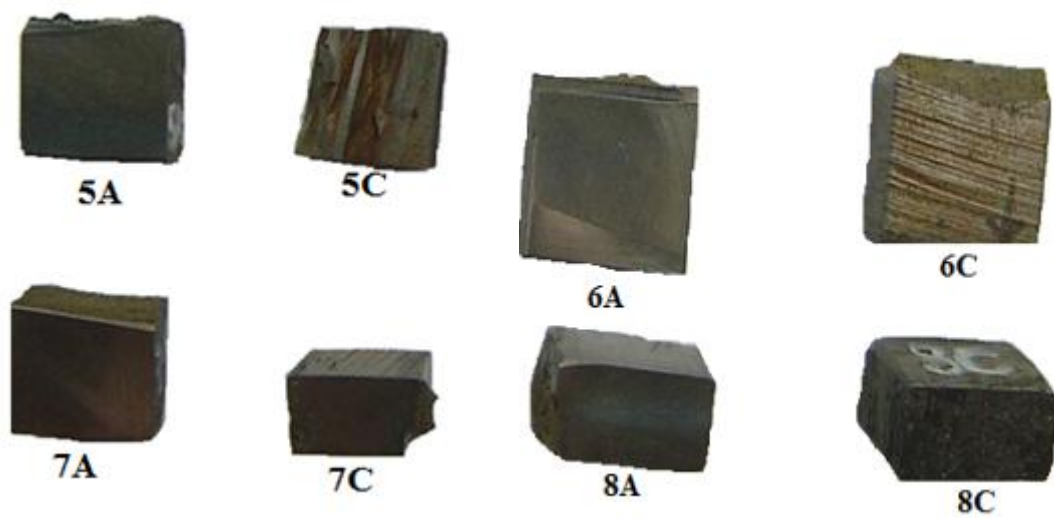


Vzorky 2 tavba – písmeno A znamená, že byl vzorek ve styku s chladítkem = ovlivněna rychlost chladnutí a písmeno C = konec téhož vzorku, bez ovlivnění rychlosti chladnutí.

Příloha 5: Tavba 3 fotodokumentace vzorků.

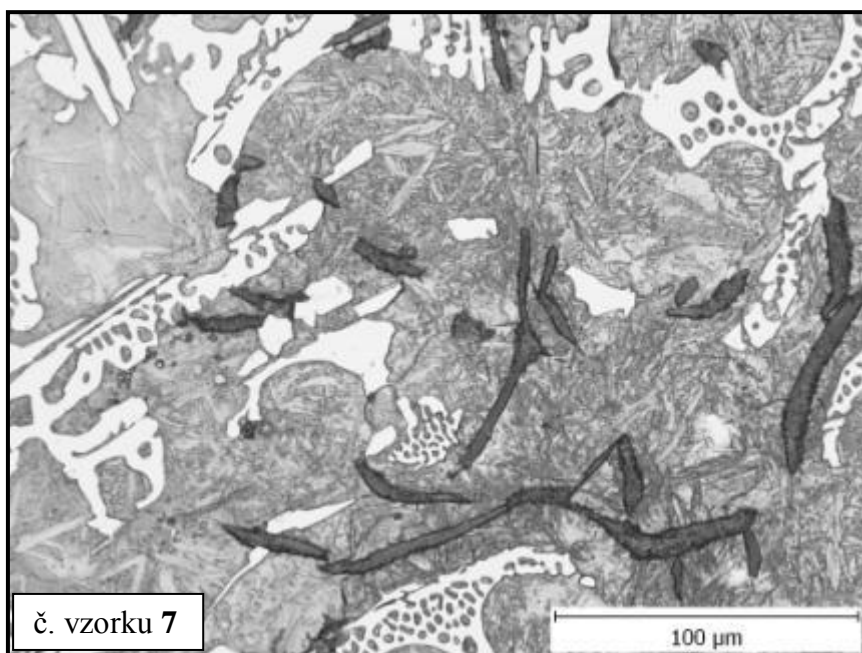


Vzorky z třetí tavby před nařezáním.

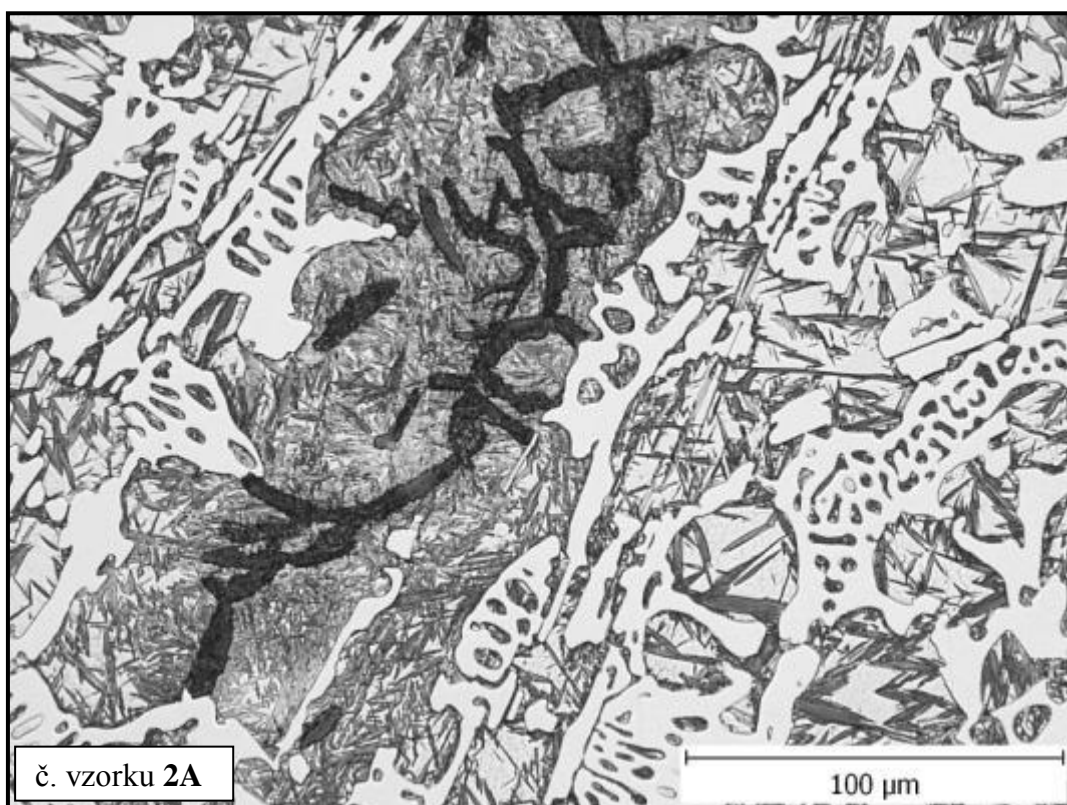


Vzorky z třetí tavby, po nařezání, připravené na metalografické zpracování.

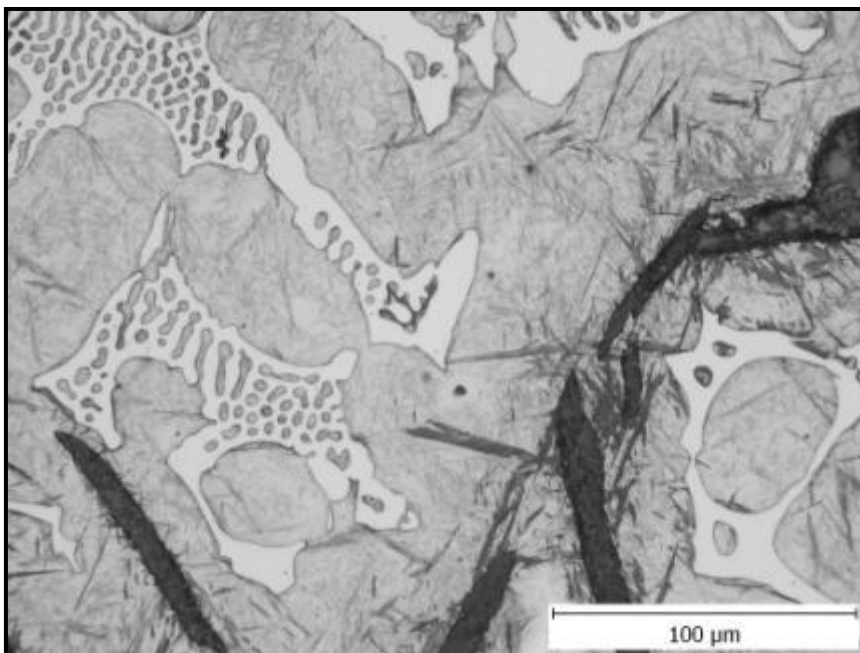
Příloha 6: Výsledné struktury několika vzorků 500x zvětšeno.



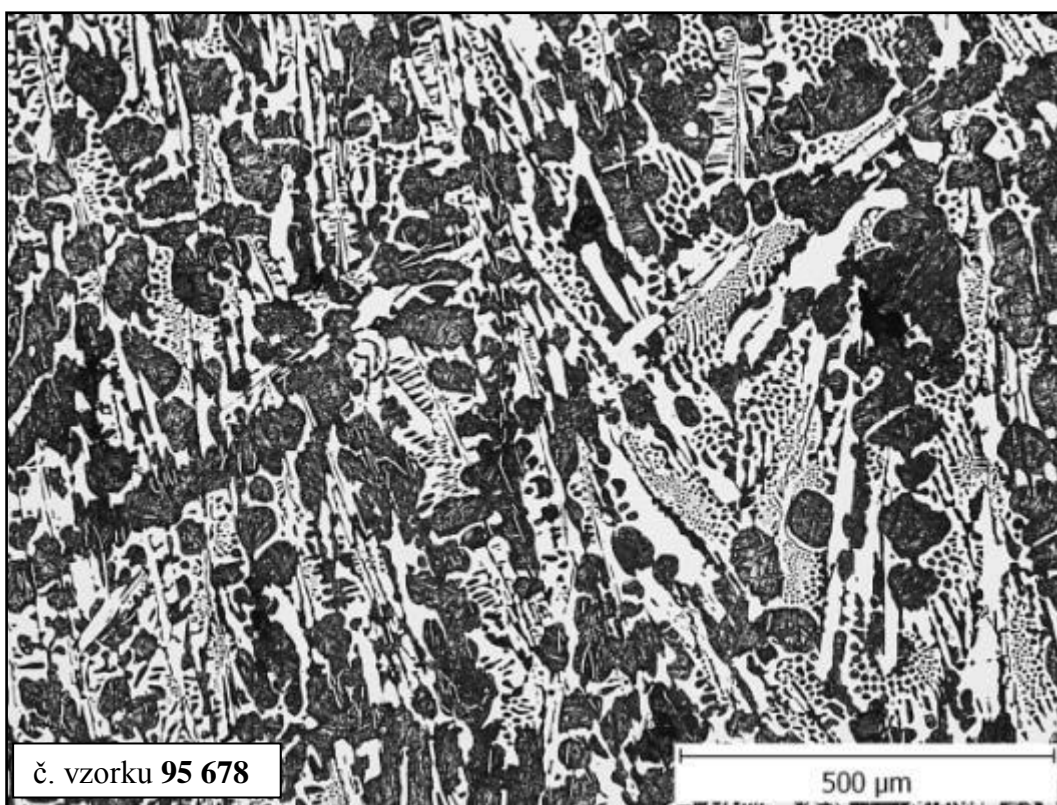
Leptáno 4% HNO_3



Leptáno 4% HNO_3



Leptáno 4% HNO₃



Leptáno 4% HNO₃

Příloha 7: Seznam obrázků.

Obrázek 2.1: Vliv mezifázového napětí na krystalizaci grafitu na vnesené částice.[1]	3
Obrázek 2.2: Vliv doby tavení na úbytek kyslíku (teplota výdrže 1290°C). [1]	5
Obrázek 2.3: Změny obsahu kyslíku v peci před očkovaním, v pánvi po očkování a po odlití. [1]	5
Obrázek 2.4: Očkování plněným profilem v pánvi a do proudu kovu. [1]	8
Obrázek 2.5: Očkování plněným profilem do proudu kovu, při odlévání. [1]	8
Obrázek 2.6: Očkování plněným profilem do mezipánve, při odlévání. [1]	8
Obrázek 2.7: Očkování pomocí kompaktních, či granulovaných očkovaadel přímo do vtokové jamky. [1]	9
Obrázek 2.8: Porovnání očkovacího efektu FeSi75 a SiC. [1]	12
Obrázek 2.9: Tvrdost dle Brinella v závislosti na obsahu bóru. [13]	15
Obrázek 2.10: Tvrdost dle Brinella v závislosti na obsahu bóru, při obsahu 0,4% Cu, není zvýšen obsah Ti, Zr, N. [13]	15
Obrázek 2.11: Křivka chladnutí litiny.	18
Obrázek 2.12: Křivka chladnutí oceli.	19
Obrázek 2.13: Vliv podchlazení na krystalizaci litiny. [1]	20
Obrázek 2.14: Ovlivnění teploty přítomnými prvky v litině. [1]	20
Obrázek 2.15: Vzhled eutektických buněk.	22
Obrázek 4.1: Průběh tvrdostí pracovní vrstvy válců ICDP. [18]	26
Obrázek 4.2: Návrh válce. [18]	26
Obrázek 4.3: Křivky tuhnutí během tavení	42
Obrázek 4.4: Řez formy. [Forma navržena z literatury 18, 17]	53
Obrázek 4.5: Schematické znázornění polohy odběrů vzorků.	54

Příloha 8: Seznam tabulek.

Tabulka 2.1: Příklady složení očkovaadel. [4]	13
Tabulka 2.2: Mechanické a strukturní vlastnosti litin v závislosti na chemickém složení odlitých zkušebních tyčí o Ø 30 mm. [13]	17
Tabulka 4.1: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost dle Vickse, hodnocení grafitu a mikrostruktury.	31
Tabulka 4.2: Směrné chemické složení vsázky.	40
Tabulka 4.3: Rozměry odlitků z první tavby.	43
Tabulka 4.4: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.	44
Tabulka 4.5: Chemické složení vzorků: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8.	44
Tabulka 4.6: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.	55
Tabulka 4.7: Chemické složení vzorků 2 tavby.	55

Tabulka 4.8: Směrné chemické složení vsázky.	63
Tabulka 4.9: Plošný obsah grafitu, průměrná mikrotvrdost, hodnocení grafitu a mikrostruktury vzorků.....	65
Tabulka 4.10: Chemické složení vzorků 3 tavby.....	65

Příloha 9: Seznam grafů.

Graf č. 4.1: Průměrné mikrotvrdosti válců.....	32
Graf č. 4.2: Průměrné mikrotvrdosti vzorků z 1 tavby.....	45
Graf č. 4.3: Průměrné mikrotvrdosti vzorků z 2 tavby.....	56
Graf č. 4.4: Průměrné mikrotvrdosti vzorků z 3 tavby.....	66